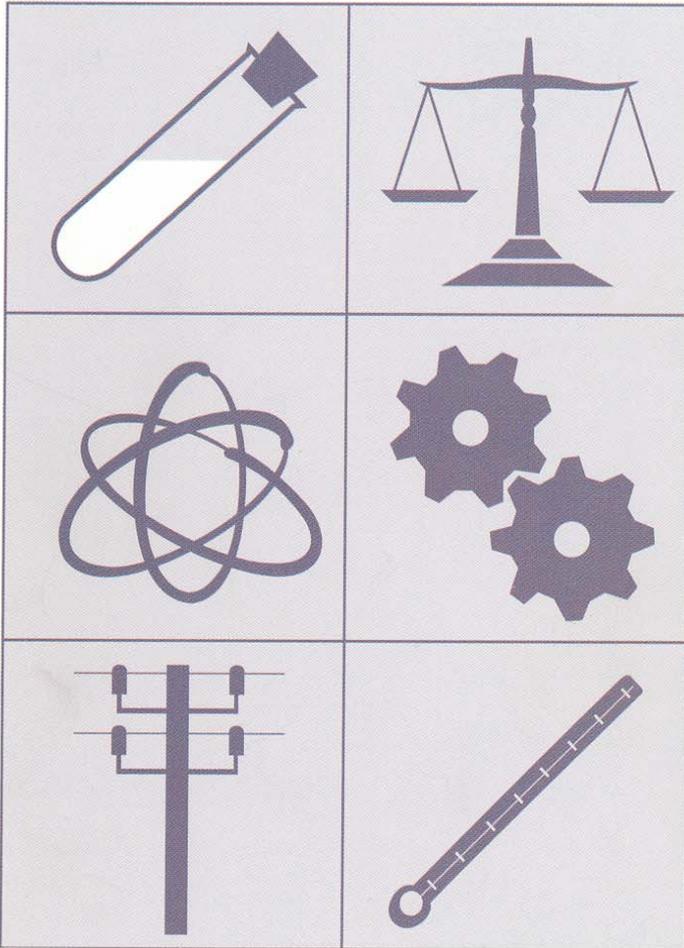


Metrología

PROCEDIMIENTO DE CALIBRACIÓN



PROCEDIMIENTO DI-009 PARA LA CALIBRACIÓN DE ESCUADRAS DE PERPENDICULARIDAD

m 10

Este procedimiento ha sido revisado, corregido y actualizado, si ha sido necesario.

La presente edición se emite en formato digital. Hay disponible una edición en papel que se puede adquirir en nuestro departamento de publicaciones.

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

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

Correo electrónico
cem@cem.es



ÍNDICE

| | Página |
|--|--------|
| 1. OBJETO | 5 |
| 2. ALCANCE | 5 |
| 3. DEFINICIONES | 5 |
| 3.1 Brazos | 6 |
| 3.2 Filos o bordes interiores | 6 |
| 3.3 Filos o bordes exteriores | 6 |
| 3.4 Longitud L1 | 6 |
| 3.5 Longitud L2 | 7 |
| 3.6 Desviación de perpendicularidad | 7 |
| 4. GENERALIDADES | 7 |
| 5. DESCRIPCIÓN | 8 |
| 5.1. Calibración con proyector de perfiles | 9 |
| 5.2. Calibración con máquina medidora de tres coordenadas | 12 |
| 5.3. Calibración con medidor de perpendicularidad de columna y mesa de planitud | 19 |
| 5.4. Calibración con medidora de redondez | 22 |
| 6. RESULTADOS | 26 |
| 6.1. Cálculo de incertidumbres | 26 |
| 6.2. Interpretación de resultados | 48 |
| 7. REFERENCIAS | 49 |



| | |
|---|----|
| 8. ANEXO: EJEMPLOS DE APLICACIÓN DEL PROCEDIMIENTO DESCRITO..... | 51 |
| 8.1. Calibración con proyector de perfiles | 51 |
| 8.2. Calibración con máquina medidora de tres coordenadas | 53 |
| 8.3. Calibración con medidor de perpendicularidad de columna y mesa de planitud | 58 |
| 8.4. Calibración con medidora de redondez | 61 |



1. OBJETO

El presente procedimiento de calibración, tiene por objeto exponer algunos de los métodos posibles para la calibración de escuadras de perpendicularidad (en adelante denominadas abreviadamente como escuadras) codificadas como D.06.02, según la Clasificación de Instrumentos de Metrología Dimensional (ref. [7]).

Para la redacción y el formato, se utiliza el procedimiento de la (ref. [1]).

2. ALCANCE

El presente procedimiento es de aplicación a escuadras de perpendicularidad de cualquier material, (acero, granito, etc.) y de cualquier forma, con bases de apoyo, biseladas, triangulares, escalonadas, etc., cuya característica fundamental común a todas ellas, es que materializan entre dos de sus filos o bordes un ángulo de 90° .

Además del ángulo recto que materializan las escuadras de perpendicularidad, puede ser conveniente verificar otras características de estos patrones como son: la rectitud de sus filos, la planitud de sus bordes o el paralelismo entre los filos o bordes exterior e interior de cada brazo de la escuadra. A efectos del presente procedimiento, se consideran como auxiliares las magnitudes citadas, no contemplándose su verificación en el mismo.

3. DEFINICIONES

En el presente procedimiento se utilizará la terminología de la (ref. [2]).

Para la mejor comprensión de las definiciones que se incluyen a continuación, ver la figura 1.

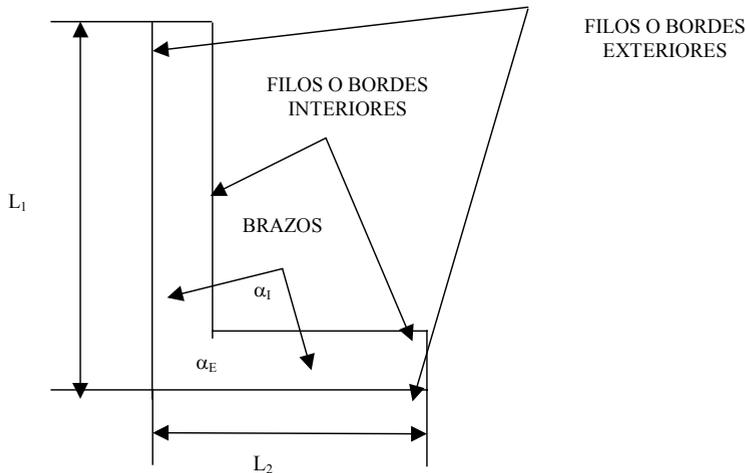


Figura 1: escuadra de perpendicularidad

3.1 Brazos:

Son cada una de las dos partes mecanizadas que constituyen la escuadra y materializan el ángulo de 90°.

3.2 Filos o bordes interiores:

Son las superficies de los brazos de la escuadra que materializan el ángulo interior (α_I) de 90°.

3.3 Filos o bordes exteriores:

Son las superficies de los brazos de la escuadra que materializan el ángulo exterior (α_E) de 90°.

3.4 Longitud L_1 :

Es la longitud del brazo más largo de la escuadra.



3.5 Longitud L_2 :

Es la longitud del brazo más corto de la escuadra.

3.6 Desviación de perpendicularidad:

Es la diferencia entre el valor del ángulo medido sobre la escuadra y su valor nominal de 90° .

4. GENERALIDADES

Las escuadras de perpendicularidad son unos patrones de acero, granito, etc., que puede adoptar formas muy diversas: con bases de apoyo, biseladas, triangulares, escalonadas, etc., cuya característica fundamental común a todas ellas, es que materializan entre sus dos filos o bordes, un ángulo de 90° .

Las escuadras de dimensiones pequeñas, entendiéndose por tales aquellas cuyos brazos tienen una longitud de hasta 200 mm ó 300 mm, se utilizan con independencia de otros patrones o instrumentos para muy diferentes usos; por ejemplo, la observación de rectitudes al trasluz, la alineación de piezas a 90° , como elementos de apoyo, en este caso suelen ser de acero, etc.

Las escuadras de dimensiones mayores, que suelen ser de acero o granito, suelen emplearse conjuntamente con una mesa de planitud (D-06.05) (ref. [7]), como patrones, elementos de referencia, de posicionamiento, etc.

Es frecuente que las escuadras de perpendicularidad materialicen dos ángulos de 90° , uno entre sus filos o bordes exteriores y otro entre sus filos o bordes interiores (Ver figura 1).

Para calibrar las escuadras de perpendicularidad se pueden utilizar los instrumentos siguientes:



Proyectores de perfiles (D.10.03) (ref. [7]).
Máquina medidora de tres coordenadas (D-02.07) (ref. [7]).
Medidor de perpendicularidad de columna (D-03.01) (ref. [7]).
Medidora de redondez (D.07.02) (ref. [7]).

El objetivo básico en el que se basa la calibración de la escuadra con cualquiera de los instrumentos antes indicados, es la determinación absoluta de su desviación de perpendicularidad.

No se contemplará en el presente procedimiento la calibración de las escuadras de perpendicularidad con soporte de calibración de escuadras (D-06.17) (ref. [7]), por ser los soportes citados, instrumentos muy raros de encontrar actualmente en los laboratorios de Metrología Dimensional.

En lo que sigue en el presente documento se utilizarán las abreviaturas siguientes:

Escuadra: escuadra de perpendicularidad.

PP: Proyector de perfiles.

M3C: Medidora de tres coordenadas.

MPC: Medidor de perpendicularidad de columna.

MR: Medidora de redondez.

5. DESCRIPCIÓN

Las escuadras de perpendicularidad deben estar identificadas al menos con un NÚMERO DE SERIE y si es posible además con la MARCA y el MODELO.

En caso de que no exista alguno de los datos antes citados, se puede proceder a la identificación de la escuadra 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 su correspondiente certificado de calibración.

5.1. Calibración con proyector de perfiles (D-10.03)

Este procedimiento está restringido a escuadras pequeñas y con fillos o bordes de poco espesor, de forma que permitan enfocar nítidamente su imagen sobre la pantalla del PP.

Este procedimiento de calibración es de precisión media, dado que normalmente la división de escala de un PP es de 1'. Se trata de un procedimiento rápido y sencillo.

5.1.1. Equipos y materiales

Para la calibración se utilizarán PP de eje horizontal con división de escala $E \leq 1'$, al objeto de que dispongan de campo de medida y mesa soporte lo suficientemente grandes para poder abarcar la longitud total de cada filo o borde de la escuadra, en un solo recorrido.

Esta calibración es conveniente realizarla en salas de Metrología en las que se mantenga la temperatura en $20\text{ °C} \pm 2\text{ °C}$, para lo cual se necesita un termómetro o un registrador de temperatura.

Como elementos auxiliares se utilizarán: una mesa nivelante, trapos y algún producto desengrasante.

5.1.2. Operaciones previas

Realizar una inspección visual de la escuadra a calibrar, para comprobar que no presenta golpes, deformaciones, oxidaciones, o cualquier otra desviación que imposibilite su uso.

Limpiar la escuadra a calibrar con un paño suave (se suelen utilizar trapos de algodón) y algún producto desengrasante (se suele utilizar una mezcla de alcohol y éter al 50%).



Colocar la escuadra sobre la mesa nivelante, situada previamente sobre la mesa del PP.

Dejar que se establezca térmicamente la escuadra, al menos durante 30 min.

Encender el PP en iluminación por proyección y nivelar uno de los fillos de la escuadra con la ayuda de la mesa de nivelación de forma que los dos puntos extremos del filo citado, queden alineados sobre uno de los trazos del retículo.

5.1.3. Proceso de Calibración

En el presente procedimiento se describe la calibración usando el retículo del PP. En la actualidad, algunos proyectores de perfiles, disponen de un sistema de fibra óptica para realizar los enrases. Si se dispone del sistema citado, el procedimiento es muy similar al del retículo, variando ligeramente la forma de obtener el ángulo de los bordes de la escuadra y siendo el cálculo idéntico.

5.1.3.1. *Calibración del ángulo formado por los fillos exteriores*

Poner a cero el sistema de lectura del PP si ello es posible, o anotar la lectura, sobre el filo previamente alineado.

Girar la pantalla del PP, hasta que el retículo quede alineado sobre el otro filo de la escuadra y anotar la lectura sobre el segundo filo. De forma simultánea a la toma de lecturas angulares, se puede aprovechar para verificar la rectitud de los fillos y el paralelismo entre los exteriores y los interiores.

Dado que la división de escala E de los proyectores es normalmente de 1', se considera suficiente realizar una sola medida en este procedimiento.

5.1.3.2. *Calibración del ángulo formado por los fillos interiores*

Se realiza de la misma forma que para los fillos exteriores, pero haciendo los enrases sobre los fillos interiores.

5.1.4. Toma y tratamiento de datos



5.1.4.1. *Calibración del ángulo formado por los fillos exteriores o interiores*

Al iniciar la calibración se debe tomar la lectura de temperatura a la que se encuentra el laboratorio, durante la misma, junto a los datos α_E , α_I , L_i y L_f .

En el caso de que el PP permita la puesta a cero en cualquier punto, se lee directamente el ángulo formado por los fillos exteriores o interiores de la escuadra:

α_E = ángulo formado por los fillos exteriores de la escuadra.

α_I = ángulo formado por los fillos interiores de la escuadra.

En el caso de que el PP no permita la puesta a cero, se obtiene el ángulo formado por los fillos exteriores o interiores de la escuadra, como la diferencia en valor absoluto entre las lecturas inicial y final:

$$\alpha_E = | L_i - L_f |$$

$$\alpha_I = | L_i - L_f |$$

siendo:

L_i = Lectura inicial.

L_f = Lectura final.

A continuación se calcula la desviación de perpendicularidad del ángulo formado por los fillos exteriores e interiores de la escuadra, según las ecuaciones siguientes:

$$D_{PE} = \alpha_E - 90^\circ$$

$$D_{PI} = \alpha_I - 90^\circ$$

siendo:



D_{PE} = Desviación de perpendicularidad de los filos exteriores de la escuadra.

D_{PI} = Desviación de perpendicularidad de los filos interiores de la escuadra.

5.1.4.2. *Desviación de perpendicularidad de la escuadra*

Si la escuadra tiene doble perpendicularidad (exterior e interior), se considera como desviación de perpendicularidad de la misma, el valor máximo de los dos anteriores:

$$D_P = \text{Máx} (D_{PE}, D_{PI})$$

5.2. Calibración con máquina medidora de tres coordenadas (D-02.07) (ref. [7])

Este procedimiento se considera adecuado para escuadras de cualquier tamaño y proporciona una buena exactitud en la calibración.

El único límite para la longitud de los brazos de la escuadra a calibrar, es el campo de medida de dos cualesquiera de los ejes de la M3C.

En principio, la escuadra puede calibrarse en cualquiera de sus dos posiciones posibles, apoyada sobre la mesa de la M3C y con un brazo vertical, o tumbada sobre la mesa de la M3C y con los dos brazos horizontales. Siempre que sea posible, se realizará la calibración en la segunda posición citada, pues esto permite prescindir de la planitud de la mesa de apoyo. Si se tiene que realizar la calibración con un brazo de la escuadra en posición vertical, se considera en general, despreciable el posible defecto de planitud de la mesa de apoyo de la M3C.

5.2.1. Equipos y materiales

Para la calibración se utilizarán medidoras de tres coordenadas, con división de escala $E \leq 5 \mu\text{m}$, preferentemente las que



disponen de un ordenador y sus correspondientes programas de medida y cálculo. No obstante el presente procedimiento se enfoca desde el punto de vista de disponer de una medidora sin ordenador; su adaptación a medidoras con ordenador resulta sencilla y rápida, puesto que en este último caso se obtienen directamente las desviaciones de perpendicularidad de la escuadra.

Como elemento auxiliar se puede utilizar un plato divisor de eje vertical, si la M3C dispone de este accesorio, trapos y algún producto desengrasante.

Esta calibración es conveniente realizarla en salas de Metrología en las que se mantenga la temperatura en $20\text{ °C} \pm 2\text{ °C}$, para lo cual se necesita un termómetro o un registrador de temperatura.

5.2.2. Operaciones previas

Realizar una inspección visual de la escuadra a calibrar, para comprobar que no presenta golpes, deformaciones, oxidaciones, o cualquier otra desviación que imposibilite su uso.

Limpiar la escuadra a calibrar con un paño suave (se suelen utilizar trapos de algodón) y algún producto desengrasante (se suele utilizar una mezcla de alcohol y éter al 50 %).

Colocar la escuadra sobre el plato divisor o sobre la mesa de apoyo de la M3C.

Dejar que se establezca térmicamente la escuadra, al menos durante 30 min.

Encender la M3C y situar los brazos de la escuadra, aproximadamente alineados según los ejes X e Y de la misma si la escuadra está apoyada horizontalmente, o alinear el brazo situado sobre la mesa de apoyo según el eje X o Y de la medidora y el brazo vertical según el eje Z, si la escuadra tiene un brazo en posición vertical.

5.2.3. Proceso de Calibración

El signo de la desviación, positivo si el ángulo de la escuadra es mayor de 90° y negativo en caso contrario, habrá de tenerse en cuenta al realizar la calibración, de acuerdo con la forma de posicionamiento de la escuadra, los sentidos crecientes de los ejes en la M3C y las posiciones relativas de los puntos de palpado.

5.2.3.1. *Calibración del ángulo formado por los fillos exteriores o interiores, con los dos brazos apoyados sobre la mesa de apoya de la medidora*

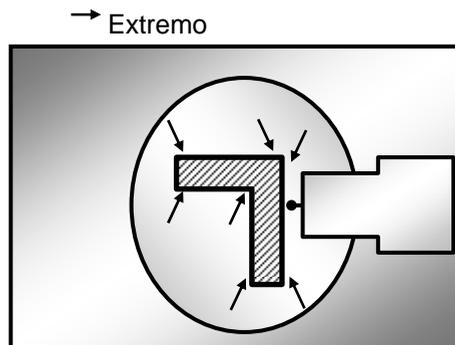


Figura 2: Escuadra apoyada con los dos brazos sobre la mesa de la M3C

Obtener las indicaciones del palpador de la M3C (X_1 y X_2), en los dos puntos extremos del filo exterior alineado según el eje Y. Seguidamente obtener las indicaciones del palpador de la M3C (Y_1 e Y_2), en los dos puntos extremos del filo exterior alineado según el eje X.

Repetir las operaciones del párrafo anterior para los fillos interiores de la escuadra.

5.2.3.2. *Calibración del ángulo formado por los filos exteriores o interiores, con un brazo apoyado sobre la mesa de apoyo de la medidora y el otro en posición vertical*

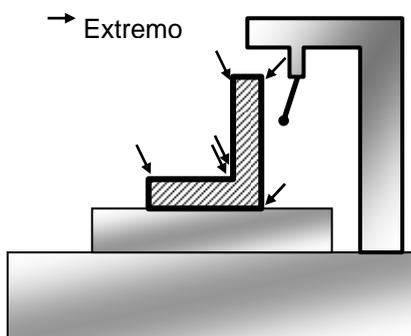


Figura 3: Escuadra apoyada con un brazo sobre la mesa de la M3C y el otro en posición vertical paralelo al eje Z

a) Filos exteriores

En este caso se desprecia la posible desviación de planitud de la mesa de apoyo de la M3C y se obtienen las indicaciones del palpador de la M3C (X_1 y X_2) o (Y_1 e Y_2), en los dos puntos extremos del filo exterior alineado según al eje Z.

b) Filos interiores

Obtener las indicaciones del palpador de la M3C (Z_1 y Z_2), en dos puntos extremos del filo interior del brazo apoyado sobre la mesa de la M3C. Seguidamente obtener las indicaciones del palpador de la M3C (X_1 y X_2) o bien (Y_1 e Y_2), en los dos puntos extremos del filo interior del brazo alineado según al eje Z.



5.2.4. Toma y tratamiento de datos

Al iniciar la calibración se debe tomar la lectura de temperatura a la que se encuentra el laboratorio, junto a los datos X_1 , X_2 , Y_1 , Y_2 , Z_1 , Z_2 , L_1 , L_2 y L .

5.2.4.1. *Calibración del ángulo formado por los filos exteriores o interiores, con los dos brazos apoyados sobre la mesa de apoyo de la medidora*

Tanto los signos de cada lectura (X_1 , X_2 , Y_1 , Y_2 , L_1 y L_2), como el de la desviación de perpendicularidad, habrán de tenerse en cuenta por el operador, de acuerdo con la forma de posicionamiento de la escuadra, los sentidos crecientes de los ejes en la M3C y las posiciones relativas de los puntos de palpado.

A partir de las indicaciones obtenidas mediante el palpado en los extremos de los brazos de la escuadra, se calcula la desviación de perpendicularidad de la misma mediante la ecuación siguiente:

$$D_{PE} \text{ ó } D_{PI} = \pm \frac{X_1 - X_2}{L_1} \pm \frac{Y_2 - Y_1}{L_2} \text{ rad}$$

siendo:

D_{PE} = Desviación de perpendicularidad de los filos exteriores de la escuadra.

D_{PI} = Desviación de perpendicularidad de los filos interiores de la escuadra.

X_1 = Lectura sobre un extremo del filo alineado según el eje Y.

X_2 = Lectura sobre el otro extremo del filo alineado según el eje Y.

Y_1 = Lectura sobre un extremo del filo alineado según el eje X.



Y_2 = Lectura sobre el otro extremo del filo alineado según el eje X.

L_1 = Longitud palpada sobre el filo alineado según el eje Y.

L_2 = Longitud palpada sobre el filo alineado según el eje X.

5.2.4.2. *Calibración del ángulo formado por los filos exteriores o interiores, con un brazo apoyado sobre la mesa de apoyo de la medidora y el otro en posición vertical*

Tanto los signos de cada lectura (X_1 , X_2 , Y_1 , Y_2 , Z_1 , Z_2 , L_1 , L_2 y L), como el de la desviación de perpendicularidad, habrán de tenerse en cuenta por el operador, de acuerdo con la forma de posicionamiento de la escuadra, los sentidos crecientes de los ejes en la máquina y las posiciones relativas de los puntos de palpado.

a) Filos exteriores

A partir de las indicaciones obtenidas mediante el palpado en los extremos del brazo de la escuadra situado en posición vertical, se calcula la desviación de perpendicularidad de la misma mediante la ecuación siguiente:

$$D_{PE} = \pm \frac{X_1 - X_2}{L} \left(0 \pm \frac{Y_2 - Y_1}{L} \right) \text{ rad}$$

siendo:

L = Longitud palpada sobre el filo alineado según el eje Z.

b) Filos interiores

A partir de las indicaciones obtenidas mediante el palpado en los extremos de los brazos de la escuadra, se calcula el



desviación de perpendicularidad de la misma mediante una de las ecuaciones siguientes:

$$D_{PI} = \pm \frac{X_1 - X_2}{L_1} \pm \frac{Z_1 - Z_2}{L_2} \text{ rad}$$

o bien:

$$D_{PI} = \pm \frac{Y_1 - Y_2}{L_1} \pm \frac{Z_1 - Z_2}{L_2} \text{ rad}$$

siendo:

X_1 ó Y_1 = Lectura sobre un extremo del filo vertical.

X_2 ó Y_2 = Lectura sobre el otro extremo del filo vertical.

Z_1 = Lectura sobre un extremo del filo horizontal.

Z_2 = Lectura sobre el otro extremo del filo horizontal.

L_1 = Longitud palpada sobre el filo vertical.

L_2 = Longitud palpada sobre el filo horizontal.

5.2.4.3. *Desviación de perpendicularidad de la escuadra*

Si la escuadra tiene doble perpendicularidad (exterior e interior), se considera como desviación de perpendicularidad de la misma, el valor máximo de los dos anteriores:

$$D_P = \text{Máx} (D_{PE}, D_{PI})$$



5.3. Calibración con medidor de perpendicularidad de columna (D.06.12) (ref. [7]) y mesa de planitud (D.06.05) (ref. [7])

Este procedimiento se considera adecuado para escuadras de perpendicularidad de grandes dimensiones o peso, siendo su exactitud media, dado que el procedimiento se basa en la propia perpendicularidad de la columna del MPC, ajustada a su vez con otro patrón, normalmente una columna de perpendicularidad (D.06.03) (ref. [7]).

5.3.1. Equipos y materiales

Para la calibración se utilizarán MPC (D.06.12) (ref. [7]), junto con una mesa de planitud (D.06.05) (ref. [7]) y un comparador electrónico (D.03.03) (ref. [7]) o mecánico (D.03.01) (ref. [7]), con los que se obtienen las lecturas.

La mesa de planitud debe ser de calidad I o mejor, según (ref. [10]).

El comparador debe tener una división de escala $E \leq 1\mu\text{m}$; respecto al resto de los equipos no necesitan ninguna condición metrológica especial.

Esta calibración es conveniente realizarla en salas de Metrología en las que se mantenga la temperatura en $20\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$, para lo cual se necesita un termómetro o un registrador de temperatura.

Como elementos auxiliares se utilizarán: trapos y algún producto desengrasante

5.3.2. Operaciones previas

Realizar una inspección visual de la escuadra a calibrar, para comprobar que no presenta golpes, deformaciones, oxidaciones, o cualquier otra desviación que imposibilite su uso.



Limpiar la escuadra a calibrar con un paño suave (se suelen utilizar trapos de algodón) y algún producto desengrasante (se suele utilizar una mezcla de alcohol y éter al 50 %).

Colocar la escuadra a calibrar verticalmente sobre la mesa de planitud.

Colocar el MPC con su comparador (electrónico o mecánico), sobre la mesa de planitud.

Dejar que se establezca térmicamente la escuadra, al menos durante 30 min.

5.3.3. Proceso de Calibración

En este procedimiento se desprecia la posible desviación de planitud de la mesa de planitud.

Por comodidad para realizar los cálculos posteriores, se recomienda poner el comparador a cero palpando sobre el punto más bajo del filo exterior del brazo vertical de la escuadra.

Obtener la indicación del comparador palpando sobre el punto más alto del filo exterior del brazo vertical de la escuadra.

Repetir estas operaciones para el filo interior del brazo vertical de la escuadra, cambiando la posición de la misma.

5.3.4. Toma y tratamiento de datos

Tanto los signos de cada lectura (Z_1 , Z_2 y L), como el de la desviación de perpendicularidad, habrán de tenerse en cuenta por el operador, de acuerdo con la forma de posicionamiento de la escuadra, los sentidos de desplazamiento del palpador y las posiciones relativas de los puntos de palpado

Al iniciar la calibración se debe tomar la lectura de temperatura a la que se encuentra el laboratorio, durante la misma, junto con los datos Z_1 , Z_2 y L .

→ Puntos de palpado

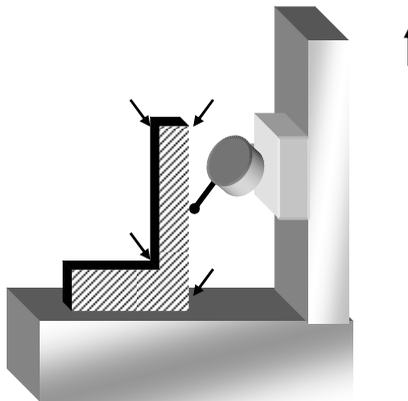


Figura 4: Puntos de palpado

A partir de las indicaciones obtenidas mediante el palpado en los extremos de los brazos de la escuadra, se calcula la desviación de perpendicularidad de la misma mediante la ecuación siguiente:

$$D_{PE} \text{ o } D_{PI} = \pm \frac{Z_2 - Z_1}{L} \text{ rad}$$

siendo:

D_{PE} = Desviación de perpendicularidad de los filos exteriores de la escuadra.

D_{PI} = Desviación de perpendicularidad de los filos interiores de la escuadra.

Z_1 = Lectura sobre el punto más bajo palpado sobre el filo vertical, normalmente y si se ha ajustado el comparador al principio, esta lectura será cero.



$Z_2 =$ Lectura sobre el punto más alto palpado sobre el filo vertical de la escuadra.

$L =$ Longitud palpada sobre el filo vertical.

5.3.4.1. *Desviación de perpendicularidad de la escuadra*

Si la escuadra tiene doble perpendicularidad (exterior e interior), se considera como desviación de perpendicularidad de la misma, el valor máximo de los dos anteriores:

$$D_P = \text{Máx} (D_{PE}, D_{PI})$$

5.4. Calibración con medidora de redondez (D.07.02) (ref. [7])

Este procedimiento se considera adecuado para escuadras de perpendicularidad de pequeñas dimensiones y con filos planos, no en forma de cuchilla, siendo su exactitud alta.

5.4.1. Equipos y materiales

Para la calibración se utilizarán MR (D.07.02) (ref. [7]) con división de escala $E \leq 1 \mu\text{m}$, que dispongan de una columna vertical que permita el desplazamiento en ese eje del brazo del palpador, la columna debe tener la longitud suficiente para poder palpar todo el filo de la escuadra.

Dada la gran diversidad de las medidoras de redondez y las prestaciones de las mismas, siendo distintas las formas de medir con cada una de ellas, en el presente procedimiento se va a contemplar la medida con una MR dotada de calculador y que a través de dos palpados rectilíneos, da directamente la desviación de perpendicularidad. En máquinas que trabajen de otra forma habría que adaptar el procedimiento a las mismas.

Como elementos auxiliares, se necesitan un soporte para bridar la escuadra sólidamente sobre el plato de la MR y que permita palpar



los dos bordes de la misma, trapos y algún producto desengrasante.

Esta calibración es conveniente realizarla en salas de Metrología en las que se mantenga la temperatura en $20\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$, para lo cual se necesita un termómetro o un registrador de temperatura.

5.4.2. Operaciones previas

Realizar una inspección visual de la escuadra a calibrar, para comprobar que no presenta golpes, deformaciones, oxidaciones, o cualquier otra desviación que imposibilite su uso.

Limpiar la escuadra a calibrar con un paño suave (se suelen utilizar trapos de algodón) y algún producto desengrasante (se suele utilizar una mezcla de alcohol y éter al 50 %).

Colocar la escuadra en su soporte, sobre el plato de la medidora de redondez.

Encender la medidora de redondez.

Dejar que se establezca térmicamente la escuadra, al menos durante 30 min.

Mediante el sistema de nivelación del plato de la medidora de redondez, nivelar el borde horizontal de la escuadra.

5.4.3. Proceso de Calibración

Realizar un palpado sobre uno de los bordes exteriores de la escuadra y tomarlo como medida de referencia.

Cambiar la posición del palpador girándolo aproximadamente 90° .

Realizar un palpado sobre el otro borde exterior de la escuadra, con lo que la máquina a través de su correspondiente programa de cálculo, da directamente el desviación de perpendicularidad.

Obtener los registros gráficos en papel de las medidas realizadas.

Girar la escuadra para situarla sobre el soporte, de forma que permita palpar sobre los bordes interiores, realizando la nivelación de nuevo si ello fuera preciso.

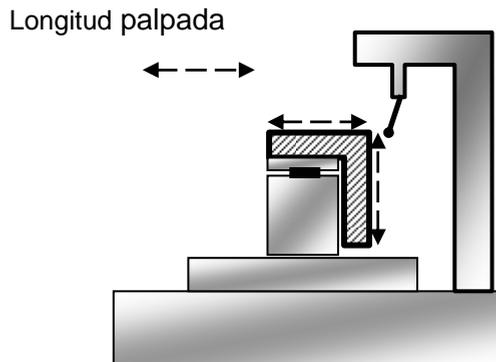


Figura 5: Calibración de los bordes exteriores

Repetir estas operaciones para los bordes interiores de la escuadra

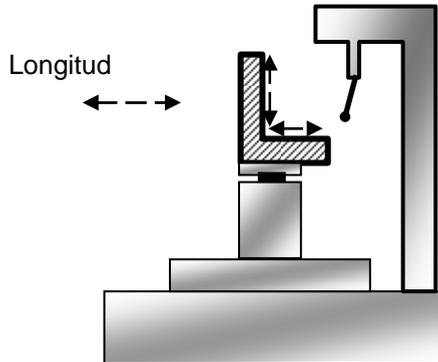


Figura 6: Calibración de los bordes interiores

5.4.4. Toma y tratamiento de datos

En este caso, la toma de datos se limita a obtener el registro gráfico que proporciona la MR con su impresora; en dicho registro figurarán los valores de la desviación de perpendicularidad.

A partir de los palpados realizados sobre los dos bordes de la escuadra, el calculador de la MR da directamente la desviación de perpendicularidad de los bordes exteriores (D_{PE}) e interiores (D_{PI}); por consiguiente no se necesita realizar ningún tratamiento posterior de los datos obtenidos.

Algunas MR dan la desviación de perpendicularidad sobre la longitud palpada en el borde que no se ha tomado como medida de referencia; en ese caso habría que transformar el resultado a unidades angulares, o expresarlo como cociente de longitudes.

5.4.4.1. *Desviación de perpendicularidad de la escuadra*

Si la escuadra tiene doble perpendicularidad (exterior e interior), se considera como desviación de perpendicularidad de la misma, el valor máximo de los dos anteriores:



$$D_P = \text{Máx} (D_{PE}, D_{PI})$$

6. RESULTADOS

Los cálculos de incertidumbre de este apartado, se realizan de acuerdo con los criterios de las referencias: [3], [4], [5] y [6].

6.1. Cálculo de incertidumbres

En los apartados siguientes, se indicará la forma de realizar el cálculo de incertidumbre, para cada uno de los procedimientos expuestos anteriormente.

6.1.1. Calibración con proyector de perfiles

En este apartado, se va a incluir el cálculo de la incertidumbre para los fillos exteriores, siendo totalmente análogo el de los fillos interiores.

La desviación de perpendicularidad de los fillos exteriores, viene dada por la expresión siguiente:

$$D_{PE} = \alpha_E - 90^\circ + C_o + C_d + C_E$$

siendo:

C_o = Corrección global obtenida del certificado de calibración del PP.

C_d = Corrección por deriva del PP desde su calibración.

C_E = Corrección por división de escala del PP.

No se consideran otras correcciones debidas a la temperatura, dado que esta influye mucho menos en la medida de ángulos que en la de longitudes; manteniendo la temperatura durante la



calibración dentro de los márgenes indicados en 5.1.1, las correcciones citadas son despreciables.

Aplicando la ley de propagación de varianzas a la ecuación de la desviación de perpendicularidad, resulta:

$$u_{D_{PE}} = \sqrt{u_{\alpha_E}^2 + u_o^2 + u_d^2 + u_E^2}$$

siendo:

$u_{D_{PE}}$ = Incertidumbre típica de la desviación de perpendicularidad de los fillos exteriores de la escuadra calibrada.

u_{α_E} = Repetibilidad de las medidas de calibración del PP, se obtiene del certificado de calibración del mismo.

u_o = Incertidumbre típica de la corrección global obtenida del certificado de calibración del PP.

u_d = Incertidumbre típica de la corrección por deriva del proyector de perfiles, desde su última calibración.

u_E = Incertidumbre típica de la corrección por división de escala del proyector.

Para la corrección global del PP se adopta el modelo de corrección global de media nula, obteniendo su incertidumbre típica del certificado de calibración del mismo.

La corrección por deriva del PP se estima a partir de los datos de las tres últimas calibraciones, considerando una corrección de media nula, con distribución uniforme de semiamplitud E/4 por año



transcurrido (siendo E la división de escala angular del proyector de perfiles). En consecuencia su varianza es:

$$u_d^2 = \frac{\left(\frac{E}{4}\right)^2}{3}$$

La corrección por división de escala, se introduce con una corrección de media nula y con distribución triangular, puesto que α_E se obtiene como diferencia de dos lecturas, su varianza es:

$$u_E^2 = \frac{E^2}{6}$$

Los estimadores de las variables y sus incertidumbres típicas se incluyen en la tabla 1 cuyo formato está recomendado en la (ref. [4]).

Tabla 1: Contribuciones a la incertidumbre combinada en la calibración de los fillos exteriores.

| Magnitud de entrada X_i | Estimación x_i | Incertidumbre típica $u(x_i)$ | Distribución de probabilidad | Coficiente de sensibilidad c_i | Contribución a la incertidumbre $u_i(y)$ |
|--|------------------|-------------------------------|------------------------------|----------------------------------|--|
| α_E | α_E | u_{α_E} | normal | 1 | u_{α_E} |
| C_o | 0 | u_o | normal | 1 | u_o |
| C_d | 0 | $\frac{E}{4 \cdot \sqrt{3}}$ | rectangular | 1 | $\frac{E}{4 \cdot \sqrt{3}}$ |
| C_E | 0 | $\frac{E}{\sqrt{6}}$ | triangular | 1 | $\frac{E}{\sqrt{6}}$ |
| Incertidumbre típica combinada (u) | | | $u = \sqrt{\sum u_i^2(y)}$ | | |
| Incertidumbre expandida ($U_{D_{PE}}$) | | | $U_{D_{PE}} = k \cdot u$ | | |



La incertidumbre expandida queda por tanto:

$$U_{D_{PE}} = k \cdot \sqrt{u_{\alpha_E}^2 + u_o^2 + \frac{E^2}{48} + \frac{E^2}{6}}$$

Para los fillos interiores viene dada por la ecuación:

$$U_{D_{PI}} = k \cdot \sqrt{u_{\alpha_E}^2 + u_o^2 + \frac{E^2}{48} + \frac{E^2}{6}}$$

En la mayor parte de los casos, las contribuciones de incertidumbre que presentan una distribución normal serán las que tienen más peso y las otras son estimaciones tipo B con grados de libertad ∞ , por tanto el factor de cobertura k será igual a 2.

6.1.2. Calibración con máquina medidora de tres coordenadas

6.1.2.1. *Calibración del ángulo formado por los fillos exteriores o interiores, con los dos brazos apoyados sobre la mesa de apoyo de la medidora*

En este apartado, se va a incluir el cálculo de la incertidumbre para los fillos exteriores, siendo totalmente análogo el de los fillos interiores.

La desviación de perpendicularidad de los fillos exteriores, viene dada por la expresión siguiente:



$$D_{PE} = \pm \frac{X_1 - X_2}{L_1} \pm \frac{Y_2 - Y_1}{L_2} + C_o + C_d + C_E$$

siendo:

C_o = Corrección global obtenida del certificado de calibración de la M3C.

C_d = Corrección por deriva de la M3C desde su calibración.

C_E = Corrección por división de escala de la M3C.

No se consideran otras correcciones debidas a la temperatura, dado que esta influye mucho menos en la medida de ángulos que en la de longitudes, manteniendo la temperatura durante la calibración dentro de los márgenes indicados en 5.1.1, las correcciones citadas son despreciables.

Aplicando la ley de propagación de varianzas a la ecuación de la desviación de perpendicularidad, resulta:

$$u_{D_{PE}}^2 = \left(\frac{\partial D_{PE}}{\partial X_1} \right)^2 \cdot u_m^2 + \left(\frac{\partial D_{PE}}{\partial X_2} \right)^2 \cdot u_m^2 + \left(\frac{\partial D_{PE}}{\partial L_1} \right)^2 \cdot u_m^2 + \left(\frac{\partial D_{PE}}{\partial Y_1} \right)^2 \cdot u_m^2 + \left(\frac{\partial D_{PE}}{\partial Y_2} \right)^2 \cdot u_m^2$$

$$+ \left(\frac{\partial D_{PE}}{\partial L_2} \right)^2 \cdot u_m^2 + \left(\frac{\partial D_{PE}}{\partial C_o} \right)^2 \cdot u_o^2 + \left(\frac{\partial D_{PE}}{\partial C_d} \right)^2 \cdot u_d^2 + \left(\frac{\partial D_{PE}}{\partial C_E} \right)^2 \cdot u_E^2$$

siendo:



$u_{D_{PE}}$ = Incertidumbre típica de la desviación de perpendicularidad de los filos exteriores de la escuadra calibrada.

u_m = Repetibilidad de las medidas de calibración de la M3C, se obtiene del certificado de calibración de la misma.

u_o = Incertidumbre típica de la corrección global obtenida del certificado de calibración de la M3C.

u_d = Incertidumbre típica de la corrección por deriva de la M3C, desde su última calibración.

u_E = Incertidumbre típica de la corrección por división de escala de la M3C.

Para la corrección global de la M3C se adopta el modelo de corrección global de media nula, obteniendo su incertidumbre típica del certificado de calibración de la misma.

La corrección por deriva de la M3C se estima a partir de los datos de las tres últimas calibraciones, considerando una corrección de media nula, con distribución uniforme de semiamplitud $E/4$ por año transcurrido (siendo E la división de escala de la M3C), en consecuencia su varianza es:

$$u_d^2 = \frac{\left(\frac{E}{4}\right)^2}{3}$$

La corrección por división de escala, se introduce con una corrección de media nula y con distribución normal, puesto que D_{PE} se obtiene a partir de cuatro lecturas, siendo la influencia de las lecturas de L_1 y L_2 despreciable, su varianza es:



$$u_d^2 = \frac{E^2}{3}$$

Calculando las derivadas parciales resulta:

$$u_{D_{PE}}^2 = \left[\left(\frac{1}{L_1} \right)^2 + \left(\frac{-1}{L_1} \right)^2 + \left(\frac{X_2 - X_1}{L_1^2} \right)^2 + \left(\frac{1}{L_2} \right)^2 + \left(\frac{-1}{L_2} \right)^2 + \left(\frac{Y_1 - Y_2}{L_2^2} \right)^2 \right] \cdot u_m^2 + u_o^2 + u_d^2 + u_E^2$$

En esta expresión se puede hacer una simplificación que consiste en despreciar los términos tercero y sexto de la ecuación, dado que el numerador cabe esperar que sea del orden de algunos μm , mientras que el denominador debe ser del orden de cientos de miles de μm , por lo que prácticamente tiende a cero; realizando la citada simplificación la ecuación queda:

$$u_{D_{PE}} = \sqrt{\left(\frac{2}{L_1^2} + \frac{2}{L_2^2} \right)} \cdot u_m^2 + u_o^2 + u_d^2 + u_E^2$$

Los estimadores de las variables y sus incertidumbres típicas se incluyen en la tabla 2 cuyo formato está recomendado en la Ref. [4].

Tabla 2: Contribuciones a la incertidumbre combinada en la calibración de los filamentos exteriores o interiores.

| Magnitud de entrada X_i | Estimación x_i | Incertidumbre típica $u(x_i)$ | Distribución de probabilidad | Coefficiente de sensibilidad c_i | Contribución a la incertidumbre $u_i(y)$ |
|--|------------------|-------------------------------|---------------------------------------|------------------------------------|--|
| X_1 | X_1 | u_m | normal | $\frac{1}{L_1}$ | $\frac{1}{L_1} \cdot u_m$ |
| X_2 | X_2 | u_m | normal | $-\frac{1}{L_1}$ | $-\frac{1}{L_1} \cdot u_m$ |
| Y_1 | Y_1 | u_m | normal | $-\frac{1}{L_2}$ | $-\frac{1}{L_2} \cdot u_m$ |
| Y_2 | Y_2 | u_m | normal | $\frac{1}{L_2}$ | $\frac{1}{L_2} \cdot u_m$ |
| C_o | 0 | u_o | rectangular | 1 | u_o |
| C_d | 0 | $\frac{E}{4 \cdot \sqrt{3}}$ | rectangular | 1 | $\frac{E}{4 \cdot \sqrt{3}}$ |
| C_E | 0 | $\frac{E}{\sqrt{3}}$ | normal | 1 | $\frac{E}{\sqrt{3}}$ |
| Incertidumbre típica combinada (u) | | | $u = \sqrt{\sum u_i^2(y)}$ | | |
| Incertidumbre expandida ($U_{D_{PE}}, U_{D_{PI}}$) | | | $U_{D_{PE}} = U_{D_{PI}} = k \cdot u$ | | |

La incertidumbre expandida de la medida de la desviación de perpendicularidad de los filamentos exteriores, viene dada por la ecuación siguiente:

$$U_{D_{PE}} = k \cdot \sqrt{\left(\frac{2}{L_1^2} + \frac{2}{L_2^2}\right) \cdot u_m^2 + u_o^2 + \frac{E^2}{48} + \frac{E^2}{3}}$$

Para obtener la incertidumbre expandida de la medida de la desviación de perpendicularidad de los filamentos interiores el cálculo es



análogo al realizado para los exteriores, viniendo dada por la ecuación siguiente:

$$U_{D_{PI}} = k \cdot \sqrt{\left(\frac{2}{L_1^2} + \frac{2}{L_2^2}\right) \cdot u_m^2 + u_o^2 + \frac{E^2}{48} + \frac{E^2}{3}}$$

En la mayor parte de los casos, las contribuciones de incertidumbre que presentan una distribución normal serán las que tienen más peso y las otras son estimaciones tipo B con grados de libertad ∞ , por tanto el factor de cobertura k será igual a 2.

6.1.2.2. *Calibración del ángulo formado por los fillos exteriores o interiores, con un brazo apoyado sobre la mesa de apoyo de la medidora y el otro en posición vertical*

1) Fillos exteriores

La desviación de perpendicularidad de los fillos exteriores, viene dada por la expresión siguiente:

$$D_{PE} = \pm \frac{X_1 - X_2}{L} + C_o + C_d + C_E$$

o bien

$$D_{PE} = \pm \frac{Y_2 - Y_1}{L} + C_o + C_d + C_E$$

En los cálculos que siguen, se van a utilizar X_1 y X_2 ; en caso de ser Y_1 y Y_2 se calcularía de la misma forma.

Siendo las correcciones C_o , C_d y C_E las mismas que se han definido en el apartado 6.1.2.1.



No se consideran otras correcciones debidas a la temperatura, dado que esta influye mucho menos en la medida de ángulos que en la de longitudes, manteniendo la temperatura durante la calibración dentro de los márgenes indicados en 5.1.1, las correcciones citadas son despreciables.

Aplicando la ley de propagación de varianzas a la ecuación de la desviación de perpendicularidad, resulta:

$$u_{D_{PE}}^2 = \left(\frac{\partial D_{PE}}{\partial X_1} \right)^2 \cdot u_m^2 + \left(\frac{\partial D_{PE}}{\partial X_2} \right)^2 \cdot u_m^2 + \left(\frac{\partial D_{PE}}{\partial L} \right)^2 \cdot u_m^2 + \\ + \left(\frac{\partial D_{PE}}{\partial C_o} \right)^2 \cdot u_o^2 + \left(\frac{\partial D_{PE}}{\partial C_d} \right)^2 \cdot u_d^2 + \left(\frac{\partial D_{PE}}{\partial C_E} \right)^2 \cdot u_E^2$$

siendo las incertidumbres $u_{D_{PE}}$, u_m , u_o , u_d y u_E las mismas que se han definido en el apartado 6.1.2.1.

Para la corrección global de la M3C se adopta el modelo de corrección global de media nula, obteniendo su incertidumbre típica del certificado de calibración de la misma.

La corrección por deriva de la M3C se estima a partir de los datos de las tres últimas calibraciones, considerando una corrección de media nula, con distribución uniforme de semiamplitud $E/4$ por año transcurrido (siendo E la división de escala de la M3C), en consecuencia su varianza es:

$$u_d^2 = \frac{\left(\frac{E}{4} \right)^2}{3}$$



La corrección por división de escala, se introduce con una corrección de media nula y con distribución triangular, puesto que D_{PE} se obtiene a partir de dos lecturas, siendo la influencia de la lectura de L despreciable, su varianza es:

$$u_d^2 = \frac{E^2}{6}$$

Calculando las derivadas parciales resulta:

$$u_{D_{PE}} = \sqrt{\left[\left(\frac{1}{L} \right)^2 + \left(\frac{-1}{L} \right)^2 + \left(\frac{X_2 - X_1}{L^2} \right)^2 \right] \cdot u_m^2 + u_o^2 + u_d^2 + u_E^2}$$

En esta expresión se puede hacer una simplificación que consiste en despreciar el término tercero de la ecuación, dado que el numerador cabe esperar que sea del orden de algunos μm , mientras que el denominador debe ser del orden de cientos de miles de μm , por lo que prácticamente tiende a cero, realizando la citada simplificación la ecuación queda:

$$u_{D_{PE}} = \sqrt{\frac{2}{L^2} \cdot u_m^2 + u_o^2 + u_d^2 + u_E^2}$$

Los estimadores de las variables y sus incertidumbres típicas se incluyen en la tabla 3 cuyo formato está recomendado en la (ref. [4]).

Tabla 3: Contribuciones a la incertidumbre combinada en la calibración de los fillos exteriores.

| Magnitud de entrada X_i | Estimación x_i | Incertidumbre típica $u(x_i)$ | Distribución de probabilidad | Coficiente de sensibilidad c_i | Contribución a la incertidumbre $u_i(y)$ |
|--|------------------|-------------------------------|---------------------------------------|----------------------------------|--|
| X_1 | X_1 | u_m | normal | $\frac{1}{L}$ | $\frac{1}{L} \cdot u_m$ |
| X_2 | X_2 | u_m | normal | $-\frac{1}{L}$ | $-\frac{1}{L} \cdot u_m$ |
| C_o | 0 | u_o | rectangular | 1 | u_o |
| C_d | 0 | $\frac{E}{4 \cdot \sqrt{3}}$ | rectangular | 1 | $\frac{E}{4 \cdot \sqrt{3}}$ |
| C_E | 0 | $\frac{E}{\sqrt{6}}$ | triangular | 1 | $\frac{E}{\sqrt{6}}$ |
| Incertidumbre típica combinada (u) | | | $u = \sqrt{\sum u_i^2(y)}$ | | |
| Incertidumbre expandida ($U_{D_{PE}}, U_{D_{PI}}$) | | | $U_{D_{PE}} = U_{D_{PI}} = k \cdot u$ | | |

La incertidumbre expandida de la medida de la desviación de perpendicularidad de los fillos exteriores, viene dada por la ecuación siguiente:

$$U_{D_{PE}} = k \cdot \sqrt{\frac{2}{L^2} \cdot u_m^2 + u_o^2 + \frac{E^2}{48} + \frac{E^2}{6}}$$

En la mayor parte de los casos, las contribuciones de incertidumbre que presentan una distribución normal serán las que tienen más peso y las otras son estimaciones tipo B con grados de libertad ∞ , por tanto el factor de cobertura k será igual a 2.



2) Filos interiores

La desviación de perpendicularidad de los filos interiores, viene dada por la expresión siguiente:

$$D_{PI} = \pm \frac{X_1 - X_2}{L_1} \pm \frac{Z_1 - Z_2}{L_2} + C_o + C_d + C_E$$

o bien:

$$D_{PI} = \pm \frac{Y_1 - Y_2}{L_1} \pm \frac{Z_1 - Z_2}{L_2} + C_o + C_d + C_E$$

Teniendo en cuenta que la estructura de estas ecuaciones es igual que la del párrafo 6.1.2.1, se omite el cálculo por ser igual al del citado punto, pasando a exponer directamente la tabla 4, en la que figuran los estimadores de las variables y sus incertidumbres típicas.



Tabla 4: Contribuciones a la incertidumbre combinada en la calibración de los fillos interiores.

| Magnitud de entrada X_i | Estimación x_i | Incertidumbre típica $u(x_i)$ | Distribución de probabilidad | Coficiente de sensibilidad c_i | Contribución a la incertidumbre $u_i(y)$ |
|--|------------------|-------------------------------|---------------------------------------|----------------------------------|--|
| X_1 | X_1 | u_m | normal | $\frac{1}{L_1}$ | $\frac{1}{L_1} \cdot u_m$ |
| X_2 | X_2 | u_m | normal | $-\frac{1}{L_1}$ | $-\frac{1}{L_1} \cdot u_m$ |
| Z_1 | Z_1 | u_m | normal | $\frac{1}{L_2}$ | $\frac{1}{L_2} \cdot u_m$ |
| Z_2 | Z_2 | u_m | normal | $-\frac{1}{L_2}$ | $-\frac{1}{L_2} \cdot u_m$ |
| C_o | 0 | u_o | rectangular | 1 | u_o |
| C_d | 0 | $\frac{E}{4 \cdot \sqrt{3}}$ | rectangular | 1 | $\frac{E}{4 \cdot \sqrt{3}}$ |
| C_E | 0 | $\frac{E}{\sqrt{3}}$ | normal | 1 | $\frac{E}{\sqrt{3}}$ |
| Incertidumbre típica combinada (u) | | | $u = \sqrt{\sum u_i^2(y)}$ | | |
| Incertidumbre expandida ($U_{D_{PE}}, U_{D_{PI}}$) | | | $U_{D_{PE}} = U_{D_{PI}} = k \cdot u$ | | |

La incertidumbre expandida de la medida de la desviación de perpendicularidad de los fillos interiores, viene dada por la ecuación siguiente:

$$U_{D_{PI}} = k \cdot \sqrt{\left(\frac{2}{L_1^2} + \frac{2}{L_2^2}\right) \cdot u_m^2 + u_o^2 + \frac{E^2}{48} + \frac{E^2}{3}}$$



En la mayor parte de los casos, las contribuciones de incertidumbre que presentan una distribución normal serán las que tienen más peso y las otras son estimaciones tipo B con grados de libertad ∞ , por tanto el factor de cobertura k será igual a 2.

6.1.2. Calibración con medidor de perpendicularidad de columna y mesa de planitud

En este apartado, se va a incluir el cálculo de la incertidumbre para los filos exteriores, siendo totalmente análogo el de los filos interiores.

La desviación de perpendicularidad de los filos exteriores, viene dada por la expresión siguiente:

$$D_{PE} = \pm \frac{Z_2 - Z_1}{L} + C_{oM} + C_C + C_d + C_E$$

siendo:

C_{oM} = Corrección global obtenida del certificado de calibración del MPC.

C_C = Corrección global obtenida del certificado de calibración del comparador del MPC.

C_d = Corrección por deriva del comparador del MPC desde su calibración.

C_E = Corrección por división de escala del comparador del MPC.

Dadas las características de calidad de la mesa de planitud indicadas en el punto 5.3.1, la contribución por su desviación de planitud es despreciable.



No se consideran otras correcciones debidas a la temperatura, dado que esta influye mucho menos en la medida de ángulos que en la de longitudes, manteniendo la temperatura durante la calibración dentro de los márgenes indicados en 5.1.1, las correcciones citadas son despreciables.

Aplicando la ley de propagación de varianzas a la ecuación de la desviación de perpendicularidad, resulta:

$$u_{D_{PE}}^2 = \left(\frac{\partial D_{PE}}{\partial Z_1} \right)^2 \cdot u_m^2 + \left(\frac{\partial D_{PE}}{\partial Z_2} \right)^2 \cdot u_m^2 + \left(\frac{\partial D_{PE}}{\partial L} \right)^2 \cdot u_m^2 + \left(\frac{\partial D_{PE}}{\partial C_{oM}} \right)^2 \cdot u_{oM}^2 + \left(\frac{\partial D_{PE}}{\partial C_c} \right)^2 \cdot u_c^2 + \left(\frac{\partial D_{PE}}{\partial C_d} \right)^2 \cdot u_d^2 + \left(\frac{\partial D_{PE}}{\partial C_d} \right)^2 \cdot u_E^2$$

siendo:

$u_{D_{PE}}$ = Incertidumbre típica de la desviación de perpendicularidad de los fillos exteriores de la escuadra calibrada.

u_m = Repetibilidad de las medidas de calibración del comparador del MPC, se obtiene del certificado de calibración de la misma.

u_{oM} = Incertidumbre típica de la corrección global obtenida del certificado de calibración del MPC.

u_c = Incertidumbre típica de la corrección global obtenida del certificado de calibración del comparador.

u_d = Incertidumbre típica de la corrección por deriva del comparador del MPC, desde su última calibración.



u_E = Incertidumbre típica de la corrección por división de escala del comparador del MPC.

La corrección por deriva del MPC se considera despreciable.

La corrección global del MPC se toma como nula, obteniendo su incertidumbre típica del certificado de calibración del mismo.

La corrección global del comparador se toma como nula, obteniendo su incertidumbre típica del certificado de calibración del mismo.

La corrección por deriva del comparador del MPC se estima a partir de los datos de las tres últimas calibraciones, siendo una corrección de media nula y con distribución uniforme de semiamplitud $E/4$ por año transcurrido (siendo E la división de escala del comparador del MPC), en consecuencia su varianza es:

$$u_d^2 = \frac{\left(\frac{E}{4}\right)^2}{3}$$

La corrección por división de escala del comparador del MPC, se introduce con una corrección de media nula y con distribución triangular puesto que D_{PE} se obtiene como diferencia de dos lecturas, su varianza es:

$$u_E^2 = \frac{E^2}{6}$$

Calculando las derivadas parciales resulta:

$$u_{D_{PE}} = \sqrt{\left[\left(\frac{1}{L}\right)^2 + \left(\frac{-1}{L}\right)^2 + \left(\frac{Z_1 - Z_2}{L^2}\right)^2 \right] \cdot u_m^2 + u_{oM}^2 + u_c^2 + u_d^2 + u_E^2}$$

En esta expresión se puede hacer una simplificación que consiste en despreciar el término tercero de la ecuación, dado que el numerador cabe esperar que sea del orden de algunos μm , mientras que el denominador debe ser del orden de cientos de miles de μm , por lo que prácticamente tiende a cero, realizando la citada simplificación la ecuación queda:

$$u_{D_{PE}} = \sqrt{\left(\frac{2}{L^2}\right)u_m^2 + u_{oM}^2 + u_c^2 + u_d^2 + u_E^2}$$

Los estimadores de las variables y sus incertidumbres típicas se incluyen en la tabla 5 cuyo formato está recomendado en la (ref. [4]).

Tabla 5: Contribuciones a la incertidumbre combinada en la calibración de los fillos exteriores.

| Magnitud de entrada X_i | Estimación x_i | Incertidumbre típica $u(x_i)$ | Distribución de probabilidad | Coefficiente de sensibilidad c_i | Contribución a la incertidumbre $u_i(y)$ |
|--|------------------|-------------------------------|---------------------------------------|------------------------------------|--|
| Z_1 | Z_1 | u_m | normal | $-\frac{1}{L}$ | $-\frac{1}{L} \cdot u_m$ |
| Z_2 | Z_2 | u_m | normal | $\frac{1}{L}$ | $\frac{1}{L} \cdot u_m$ |
| C_{oM} | 0 | u_{oM} | normal | 1 | u_{oM} |
| C_c | 0 | u_c | normal | 1 | u_c |
| C_d | 0 | $\frac{E}{4 \cdot \sqrt{3}}$ | rectangular | 1 | $\frac{E}{4 \cdot \sqrt{3}}$ |
| C_E | 0 | $\frac{E}{\sqrt{6}}$ | triangular | 1 | $\frac{E}{\sqrt{6}}$ |
| Incertidumbre típica combinada (u) | | | $u = \sqrt{\sum u_i^2(y)}$ | | |
| Incertidumbre expandida ($U_{D_{PE}}, U_{D_{PI}}$) | | | $U_{D_{PE}} = U_{D_{PI}} = k \cdot u$ | | |



La incertidumbre expandida de la medida de la desviación de perpendicularidad de los fillos exteriores, viene dada por la ecuación siguiente:

$$u_{D_{PE}} = \sqrt{\left(\frac{2}{L^2}\right)u_m^2 + u_{oM}^2 + u_c^2 + \frac{E^2}{48} + \frac{E^2}{6}}$$

Para obtener la incertidumbre expandida de la medida de la desviación de perpendicularidad de los fillos interiores el cálculo es análogo al realizado para los exteriores, viniendo dada por la ecuación siguiente:

$$u_{D_{PI}} = \sqrt{\left(\frac{2}{L^2}\right)u_m^2 + u_{oM}^2 + u_c^2 + \frac{E^2}{48} + \frac{E^2}{6}}$$

En la mayor parte de los casos, las contribuciones de incertidumbre que presentan una distribución normal serán las que tienen más peso y las otras son estimaciones tipo B con grados de libertad ∞ , por tanto el factor de cobertura k será igual a 2.

6.1.3. Calibración con medidora de redondez

En este apartado, se va a incluir el cálculo de la incertidumbre para los fillos exteriores, siendo totalmente análogo el de los fillos interiores.

La desviación de perpendicularidad de los fillos exteriores, viene dada por la expresión siguiente:

$$D_{PE} = d_{PE} + C_o + C_d + C_E$$

siendo:



d_{PE} = Lectura de la desviación de perpendicularidad de los fillos exteriores, obtenida directamente del gráfico de la MR.

C_o = Corrección global obtenida del certificado de calibración de la MR.

C_d = Corrección por deriva de la MR desde su calibración.

C_E = Corrección por división de escala de la MR.

No se consideran otras correcciones debidas a la temperatura, dado que esta influye mucho menos en la medida de ángulos que en la de longitudes, manteniendo la temperatura durante la calibración dentro de los márgenes indicados en 5.1.1, las correcciones citadas son despreciables.

Aplicando la ley de propagación de varianzas a la ecuación de la desviación de perpendicularidad, resulta:

$$u_{D_{PE}} = \sqrt{u_{d_{PE}}^2 + u_o^2 + u_d^2 + u_E^2}$$

siendo:

$u_{D_{PE}}$ = Incertidumbre típica de la desviación de perpendicularidad de los fillos exteriores de la escuadra calibrada.

$u_{d_{PE}}$ = Repetibilidad de las medidas de calibración de la MR, se obtiene del certificado de calibración de la misma.

u_o = Incertidumbre típica de la corrección global obtenida del certificado de calibración de la MR.



u_d = Incertidumbre típica de la corrección por deriva de la MR, desde su última calibración.

u_E = Incertidumbre típica de la corrección por división de escala de la MR.

Para la corrección global de la MR se adopta el modelo de corrección global nula, obteniendo su incertidumbre típica del certificado de calibración de la misma.

La corrección por deriva de la MR se estima a partir de los datos de las tres últimas calibraciones, siendo una corrección de media nula y con distribución uniforme de semiamplitud $E/4$ por año transcurrido (siendo E la división de escala de la MR), en consecuencia su varianza es:

$$u_d^2 = \frac{\left(\frac{E}{4}\right)^2}{3}$$

La corrección por división de escala, se introduce con una corrección de media nula y con distribución uniforme de semiamplitud $E/2$, su varianza es:

$$u_E^2 = \frac{(E/2)^2}{3}$$

Los estimadores de las variables y sus incertidumbres típicas se incluyen en la tabla 6 cuyo formato está recomendado en la (ref. [4]).

Tabla 6: Contribuciones a la incertidumbre combinada en la calibración de los fillos exteriores.

| Magnitud de entrada X_i | Estimación x_i | Incertidumbre típica $u(x_i)$ | Distribución de probabilidad | Coficiente de sensibilidad c_i | Contribución a la incertidumbre $u_i(y)$ |
|--|------------------|-------------------------------|------------------------------|----------------------------------|--|
| D_{PE} | d_{PE} | $u_{d_{PE}}$ | normal | 1 | $u_{d_{PE}}$ |
| C_o | 0 | u_o | normal | 1 | u_o |
| C_d | 0 | $\frac{E}{4 \cdot \sqrt{3}}$ | rectangular | 1 | $\frac{E}{4 \cdot \sqrt{3}}$ |
| C_E | 0 | $\frac{E}{2 \cdot \sqrt{3}}$ | rectangular | 1 | $\frac{E}{2 \cdot \sqrt{3}}$ |
| Incertidumbre típica combinada (u) | | | $u = \sqrt{\sum u_i^2(y)}$ | | |
| Incertidumbre expandida ($U_{D_{PE}}$) | | | $U_{D_{PE}} = k \cdot u$ | | |

La incertidumbre expandida queda por tanto:

$$U_{D_{PE}} = k \cdot \sqrt{u_{d_{PE}}^2 + u_o^2 + \frac{E^2}{48} + \frac{E^2}{12}}$$

Para obtener la incertidumbre expandida de la medida del desviación de perpendicularidad de los fillos interiores el cálculo es análogo al realizado para los exteriores, viniendo dada por la ecuación siguiente:

$$U_{D_{PI}} = k \cdot \sqrt{u_{d_{PI}}^2 + u_o^2 + \frac{E^2}{48} + \frac{E^2}{12}}$$

En la mayor parte de los casos, las contribuciones de incertidumbre que presentan una distribución normal serán las que



tienen más peso y las otras son estimaciones tipo B con grados de libertad ∞ , por tanto el factor de cobertura k será igual a 2.

6.2. Interpretación de resultados

Dado que la única normalización existente sobre las escuadras de perpendicularidad es la norma DIN 875-1 de julio de 2005 (ref [10]) y que la citada norma no tiene correspondencia con ISO ni con UNE, la tabla 2 (de la norma citada) de clasificación de las escuadras en clases 00, 0, 1 y 2, se considera meramente orientativa.

En los certificados de calibración, debe figurar, la desviación de perpendicularidad de la escuadra y la incertidumbre expandida con su correspondiente factor de cobertura k ; de forma optativa se puede dar la clase en que está la escuadra según la norma DIN antes citada, indicando expresamente la referencia completa de la misma (ref. [10]).

Si se da la clase de la escuadra según la norma antes citada, la desviación de perpendicularidad con su incertidumbre debe ser menor que el valor correspondiente de la tabla 2 de la norma.

6.2.1. Períodos de recalibración

A título orientativo, se consideran adecuados los períodos de recalibración que se indican en la tabla 7.

Tabla 7: Períodos de recalibración

| Calidad | Período de recalibración |
|---------|--------------------------|
| 00 | De 48 a 60 meses |
| 0 | De 36 a 60 meses |
| 1 Y 2 | De 24 a 60 meses |

En cualquier caso estos períodos son una mera recomendación, siendo el usuario de las escuadras de perpendicularidad quien debe fijar el valor que considere oportuno.



Los períodos de recalibración antes indicados, se deberían reducir en el caso de 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.), o
- Cuando se necesiten requisitos especiales de seguridad (Defensa, Sanidad, Justicia, etc.).

Siempre debe procederse a una recalibración de las escuadras de perpendicularidad, si se ha realizado una reparación o cuando los resultados que se estén obteniendo hagan dudar al usuario del correcto estado de estos equipos.

7. REFERENCIAS

- [1] Procedimiento para la elaboración de procedimientos de calibración. Grupo de Trabajo MINER-CEM. Ed. 1., 1998, Tres Cantos, Madrid.
- [2] Vocabulario Internacional de Metrología. Conceptos fundamentales y generales y términos asociados, Centro Español de Metrología, 3ª Ed., 2008, 88 págs., NIPO: 706-08-008-4.
- [3] Guide to the expression of uncertainty in measurement, International Organization for Standardization (ISO), 1ª Ed. corrected and reprinted, 101 pgs., ISBN 92-67-10188-9, 1995.
- [4] Guía para la expresión de la incertidumbre de medida, versión española 2ª edición, Ministerio de Fomento, Centro Español de Metrología, 2000, Tres Cantos Madrid. NIPO: 165-00-004-0.



- [5] Expresión de la incertidumbre de medida en las calibraciones. CEA-ENAC-LC/02, Rev. 1, Entidad Nacional de Acreditación (ENAC), Enero 1998.
- [6] Expressions of the Uncertainty of Measurements in Calibration. EA-4/02, European co-operation for Accreditation (EA). Diciembre 1999, CE.
- [7] Clasificación de Instrumentos de Metrología Dimensional, Centro Español de Metrología, 1ª Ed., 2005, 261 págs., Madrid.
- [8] Proceso de calibración D-022 para escuadras de perpendicularidad D-06.02. Dirección General de Política Tecnológica del Ministerio de Industria y Energía. Sistema de Calibración Industrial (SCI), Edición inicial Diciembre de 1988.
- [9] Norma DIN 875-1, julio de 2005 “90° Steel Squares”
- [10] UNE 82309-2 (1997) y UNE 82309-1 (1999), Mesas de planitud. (AENOR).



8. ANEXO. EJEMPLOS DE APLICACIÓN DEL PROCEDIMIENTO DESCRITO

8.1. Calibración con proyector de perfiles.

Se calibra una escuadra de las siguientes características:

- Longitud de brazos 150 mm y 100 mm
- Dispone de fillos exteriores e interiores.

La calibración se realiza con un proyector de perfiles de las siguientes características:

- Proyector de eje horizontal.
- Dispone de puesta a cero en cualquier punto de su escala angular.
- División de escala angular $E = 1'$.
- $u_{aE} = 1,0'$
- $u_o = 2,0'$
- Ha pasado un año desde la última vez que se calibró la escala angular.

Se realiza la calibración de la forma descrita en el apartado 5.1.3, obteniéndose las lecturas y resultados que se indican en la tabla 8.



Tabla 8: Toma de datos y cálculos realizados

| | LECTURAS | | CÁLCULOS | |
|-----------------|----------|--------|------------|----------|
| Ángulo Exterior | L_i | L_f | α_E | D_{PE} |
| | 0° 0′ | 90° 5′ | 90° 5′ | 5′ |
| Ángulo interior | L_i | L_f | α_i | D_{PI} |
| | 0° 0′ | 90° 6′ | 90° 6′ | 6′ |

La desviación de perpendicularidad de la escuadra es:

$$D_P = \text{Máx} (D_{PE}, D_{PI}) = 6'$$

La incertidumbre expandida se calcula según lo indicado en el apartado 6.1.1.

Realizando los cálculos indicados en la tabla 1 del apartado 6.1.1, se obtienen los resultados de la tabla 9.

Tabla 9: Contribuciones a la incertidumbre combinada en la calibración de la escuadra.

| Magnitud de entrada X_i | Estimación x_i | Incertidumbre típica $u(x_i)$ | Distribución de probabilidad | Coficiente de sensibilidad c_i | Contribución a la incertidumbre $u_i(y)$ |
|--|------------------|-------------------------------|------------------------------------|----------------------------------|--|
| α_1 | 6´ | 1,0´ | normal | 1 | 1,0´ |
| C_o | 0 | 2,0´ | normal | 1 | 2,0´ |
| C_d | 0 | $\frac{1}{4 \cdot \sqrt{3}}$ | rectangular | 1 | 0,14´ |
| C_E | 0 | $\frac{1}{\sqrt{6}}$ | triangular | 1 | 0,40´ |
| Incertidumbre típica combinada (u) | | | $u = \sqrt{\sum u_i^2(y)} = 2,28´$ | | |
| Incertidumbre expandida ($U_{D_{PE}}$) | | | $U_{D_{PE}} = k \cdot u = 4,56´$ | | |

En resumen:

$$D_P = 6' \pm 5' \text{ (para } k = 2\text{)}$$

8.2. Calibración con máquina medidora de tres coordenadas.

Se calibra una escuadra de las siguientes características:

- Longitud de brazos 300 mm y 200 mm
- Calidad 0.
- Dispone de fillos exteriores e interiores.

La calibración se realiza con una máquina medidora de tres coordenadas, de las siguientes características:



- Lectura analógica.
- División de escala $E = 1 \mu\text{m}$.
- $u_m = 1 \mu\text{m}$.
- $u_o = 1 \mu\text{m}$.
- Ha pasado un año desde la última vez que se calibró la M3C.
- Dispone de un plato divisor de eje vertical.

8.2.1. Calibración del ángulo formado por los fillos exteriores o interiores, con los dos brazos apoyados sobre la mesa de apoyo de la medidora

Se realiza la calibración en la forma descrita en el apartado 5.2.3.1, obteniéndose las lecturas que se indican en la tabla 10.

Tabla 10: Toma de datos de la calibración

| Borde | Brazo y eje | Longitud entre palpados | Lecturas | Signo de la desviación respecto 90° |
|----------|-------------|-------------------------|------------------------------------|--|
| Exterior | 300 X | $L_1 = 290,002$ | $Y_1 = 45,261$ $Y_2 = 45,266$ | + |
| | 200 Y | $L_2 = 190,003$ | $X_1 = 56,477$ $X_2 = 56,472$ | - |
| Interior | 300 X | $L_1 = 275,000$ | $Y_1 = 99,380$ $Y_2 = 99,385$ | + |
| | 200 Y | $L_2 = 175,001$ | $X_1 = 115,124$ $X_2 = 115,118$ | - |

A partir de los datos de la tabla 10, se obtienen las desviaciones de perpendicularidad de la escuadra, de acuerdo con las ecuaciones del apartado 5.2.4.1.



$$D_{PE} = \pm \frac{X_1 - X_2}{L_1} \pm \frac{Y_2 - Y_1}{L_2} = -\frac{56,477 - 56,472}{290,002} + \frac{45,266 - 45,261}{190,003} = 9,07 \cdot 10^{-6} \text{ rad} = 1,8''$$

$$D_{PI} = \pm \frac{X_1 - X_2}{L_1} \pm \frac{Y_2 - Y_1}{L_2} = -\frac{115,124 - 115,118}{275,000} + \frac{99,385 - 99,380}{175,001} = 6,75 \cdot 10^{-6} \text{ rad} = 1,4''$$

De acuerdo con lo indicado en el apartado 5.2.4.3, la desviación de perpendicularidad de la escuadra es:

$$D_P = \text{Máx} (D_{PE}, D_{PI}) = \text{Máx} (1,8''; 1,4'') \cong 2''$$

Realizando los cálculos indicados en la tabla 2 del apartado 6.1.2.1, se obtienen los resultados de la tabla 11.

Nota: Las componentes de incertidumbre de C_o , C_d y C_E , se obtienen dividiendo $u(x_i)$ por la menor de las distancias L_1 o L_2 , para que queden expresadas en unidades angulares.



Tabla 11: Contribuciones a la incertidumbre combinada en la calibración de los filos exteriores o interiores.

| Magnitud de entrada X_i | Estimación x_i (mm) | Incertidumbre típica $u(x_i)$ (μm) | Distribución de probabilidad | Coefficiente de sensibilidad C_i (μm) | Contribución a la incertidumbre $u_i(y)$ ($''$) |
|--|-----------------------|---|---|--|---|
| X_1 | 56,477 | 1 | normal | $3,4 \cdot 10^{-6}$ | 0,71 |
| X_2 | 56,472 | 1 | normal | $-3,4 \cdot 10^{-6}$ | -0,71 |
| Y_1 | 45,261 | 1 | normal | $-5,2 \cdot 10^{-6}$ | -1,08 |
| Y_2 | 45,266 | 1 | normal | $5,2 \cdot 10^{-6}$ | 1,08 |
| C_o | 0 | 1 | rectangular | 1 | 1,08 |
| C_d | 0 | 0,14 | rectangular | 1 | 0,15 |
| C_E | 0 | 0,57 | normal | 1 | 0,62 |
| Incertidumbre típica combinada (u) | | | $u = \sqrt{\sum u_i^2(y)} = 2,22 ''$ | | |
| Incertidumbre expandida ($U_{D_{PE}}, U_{D_{PI}}$) | | | $U_{D_{PE}} = U_{D_{PI}} = k \cdot u = 4,45 ''$ | | |

En resumen:

$$\boxed{D_P = 2'' \pm 4,45'' \text{ (para } k = 2\text{)}}$$

La desviación de perpendicularidad admisible para esta escuadra según DIN 875 es de 7,56'', en consecuencia la escuadra está dentro de tolerancia en calidad 0 de acuerdo con la norma citada.

8.2.2. Calibración del ángulo formado por los filos exteriores o interiores, con un brazo apoyado sobre la mesa de apoyo de la medidora y el otro en posición vertical

Se realiza la calibración en la forma descrita en el apartado 5.2.3.2, obteniéndose las lecturas que se indican en la tabla 12.



Se sitúa el brazo de 300 mm en posición vertical.

Tabla 12: Toma de datos de la calibración

| Borde | Brazo vertical | Longitud entre palpados | Lecturas | Signo de la desviación respecto 90° |
|----------|----------------|-------------------------|--|-------------------------------------|
| Exterior | 300 | L = 290,001 | X ₁ = 75,324 X ₂ = 75,321 | + |

A partir de los datos de la tabla 12, se obtiene la desviación de perpendicularidad de los filos exteriores de la escuadra, de acuerdo con la ecuación del apartado 5.2.4.2.

$$D_{PE} = \pm \frac{X_1 - X_2}{L} = \frac{75,324 - 75,321}{290,001} = 1,03 \cdot 10^{-5} \text{ rad} = 2,1''$$

Realizando los cálculos indicados en la tabla 3 del apartado 6.1.2.2, se obtienen los resultados de la tabla 13.

Nota: Las componentes de incertidumbre de C_o, C_d y C_E, se obtienen dividiendo u(x_i) por la menor de las distancias L₁ o L₂, para que queden expresadas en unidades angulares.



Tabla 13: Contribuciones a la incertidumbre combinada en la calibración de los fillos exteriores.

| Magnitud de entrada X_i | Estimación x_i (mm) | Incertidumbre típica $u(x_i)$ (μm) | Distribución de probabilidad | Coefficiente de sensibilidad c_i (μm) | Contribución a la incertidumbre $u_i(y)$ ($''$) |
|--|-----------------------|---|---|--|---|
| X_1 | 75,324 | 1 | normal | $3,4 \cdot 10^{-6}$ | 0,71 |
| X_2 | 75,321 | 1 | normal | $3,4 \cdot 10^{-6}$ | -0,71 |
| C_o | 0 | 1 | rectangular | 1 | 1,08 |
| C_d | 0 | 0,14 | rectangular | 1 | 0,10 |
| C_E | 0 | 0,40 | triangular | 1 | 0,41 |
| Incertidumbre típica combinada (u) | | | $u = \sqrt{\sum u_i^2(y)} = 1,53 ''$ | | |
| Incertidumbre expandida ($U_{D_{PE}}, U_{D_{PI}}$) | | | $U_{D_{PE}} = U_{D_{PI}} = k \cdot u = 3,07 ''$ | | |

En resumen:

$$D_P = 2'' \pm 3'' \quad (\text{para } k = 2)$$

La desviación de perpendicularidad admisible para esta escuadra según DIN 875 es de 7,56'', en consecuencia la escuadra está dentro de tolerancia en calidad 0 de acuerdo con la norma citada.

NOTA: No se incluye ejemplo para los fillos interiores en este caso, por ser el cálculo totalmente análogo al del punto 1.2.1.

8.3. Calibración con medidor de perpendicularidad de columna y mesa de planitud.

Se calibra una escuadra de las siguientes características:

- Longitud de brazos 300 mm y 200 mm
- Dispone de fillos exteriores e interiores.



La calibración se realiza con un medidor de perpendicularidad de columna, dotado de un comparador mecánico y apoyado sobre una mesa de planitud de calidad I, las características de estos equipos son las siguientes:

- MPC con $u_{oM} = 1'$.
- División de escala del comparador $E = 1 \mu\text{m}$.
- $u_m = 1 \mu\text{m}$.
- $u_c = 1 \mu\text{m}$.
- Ha pasado un año desde la última vez que se calibraron el MPC y el comparador.

Se realiza la calibración en la forma descrita en el apartado 5.3.1, obteniéndose las lecturas que se indican en la tabla 14.

Tabla 14: Toma de datos de la calibración

| Borde | Brazo | Longitud entre palpados (mm) | Lecturas (μm) | Signo de la desviación respecto 90° |
|----------|-------|------------------------------|----------------------------|--|
| Exterior | 300 | $L_1 = 290,003$ | $Z_1 = 0,0$ $Z_2 = 4,0$ | + |
| Interior | 300 | $L_1 = 275,002$ | $Z_1 = 0,0$ $Z_2 = 3,0$ | + |

A partir de los datos de la tabla 14, se obtienen las desviaciones de perpendicularidad de la escuadra, de acuerdo con las ecuaciones del apartado 5.3.4.



$$D_{PE} = \pm \frac{Z_2 - Z_1}{L} = + \frac{4,0 - 0,0}{290,003} = 1,37 \cdot 10^{-5} \text{ rad} = 2,8''$$

$$D_{PI} = \pm \frac{Z_2 - Z_1}{L} = + \frac{3,0 - 0,0}{275,002} = 1,09 \cdot 10^{-5} \text{ rad} = 2,2''$$

De acuerdo con lo indicado en el apartado 5.3.4.1, la desviación de perpendicularidad de la escuadra es:

$$D_P = \text{Máx} (D_{PE}, D_{PI}) = \text{Máx} (2,8''; 2,2'') \cong 3''$$

Realizando los cálculos indicados en la tabla 5 del apartado 6.1.2, se obtienen los resultados de la tabla 15.

Nota:

Las componentes de incertidumbre de C_o , C_d y C_E , se obtienen dividiendo $u(x_i)$ por la menor de las distancias L_1 o L_2 , para que queden expresadas en unidades angulares.



Tabla 15: Contribuciones a la incertidumbre combinada en la calibración de los filos exteriores.

| Magnitud de entrada X_i | Estimación x_i (μm) | Incertidumbre típica $u(x_i)$ | Distribución de probabilidad | Coefficiente de sensibilidad c_i (μm) | Contribución a la incertidumbre $u_i(y)$ (") |
|--|------------------------------------|-------------------------------|--|--|--|
| Z_1 | 0 | 1 μm | normal | $-3,4 \cdot 10^{-6}$ | -0,71 |
| Z_2 | 3 | 1 μm | normal | $3,4 \cdot 10^{-6}$ | 0,71 |
| C_{OM} | 0 | 60" | normal | 1 | 60 |
| C_c | 0 | 1 μm | normal | 1 | 0,70 |
| C_d | 0 | 0,14 μm | rectangular | 1 | 0,10 |
| C_E | 0 | 0,40 μm | triangular | 1 | 0,29 |
| Incertidumbre típica combinada (u) | | | $u = \sqrt{\sum u_i^2(y)} = 60,01 "$ | | |
| Incertidumbre expandida ($U_{D_{PE}}, U_{D_{PI}}$) | | | $U_{D_{PE}} = U_{D_{PI}} = k \cdot u = 120,02 "$ | | |

En resumen:

$$D_P = 3'' \pm 120'' \text{ (para } k = 2)$$

8.4. Calibración con medidora de redondez.

Se calibra una escuadra de las siguientes características:

- Longitud de brazos 300 mm y 200 mm
- Dispone de filos exteriores e interiores.



La calibración se realiza con una medidora de redondez, de las siguientes características:

- División de escala $E = 0,01 \mu\text{m}$, expresada en unidades angulares:

$$E = 0,01 \mu\text{m}/100 \text{ mm} = 0,02''$$

- $u_{d_{PE}} = 0,6''$.
- $u_o = 1''$.
- Ha pasado un año desde la última vez que se calibró la MR.

Se realiza la calibración en la forma descrita en el apartado 5.4.3, obteniéndose los gráficos que se incluyen en las figuras 7 y 8.

De estos gráficos se obtienen directamente las desviaciones de perpendicularidad de los fillos exteriores e interiores:

$$D_{PE} = \frac{36,33 \mu\text{m}}{100 \text{ mm}} = 74,9''$$

$$D_{PI} = \frac{11,07 \mu\text{m}}{90 \text{ mm}} = 25,3''$$

De acuerdo con lo indicado en el apartado 5.4.4.1, la desviación de perpendicularidad de la escuadra es:

$$D_P = \text{Máx}(D_{PE}, D_{PI}) = \text{Máx}(74,9''; 25,3'') \cong 75''$$

Realizando los cálculos indicados en la tabla 6 del apartado 6.1.3, se obtienen los resultados de la tabla 16.



Tabla 16: Contribuciones a la incertidumbre combinada en la calibración de los fillos exteriores.

| Magnitud de entrada X_i | Estimación x_i | Incertidumbre típica $u(x_i)$ (") | Distribución de probabilidad | Coficiente de sensibilidad c_i | Contribución a la incertidumbre $u_i(y)$ (") |
|--|------------------|-----------------------------------|-------------------------------------|----------------------------------|--|
| D_{PE} | 74,9 " | 0,6 | normal | 1 | 0,6 |
| C_o | 0 | 1 | normal | 1 | 1 |
| C_d | 0 | 0,002 | rectangular | 1 | 0,002 |
| C_E | 0 | 0,005 | rectangular | 1 | 0,005 |
| Incertidumbre típica combinada (u) | | | $u = \sqrt{\sum u_i^2(y)} = 1,16 "$ | | |
| Incertidumbre expandida ($U_{D_{PE}}$) | | | $U_{D_{PE}} = k \cdot u = 2,33 "$ | | |

En resumen:

$$D_P = 75'' \pm 2'' \text{ (para } k = 2)$$

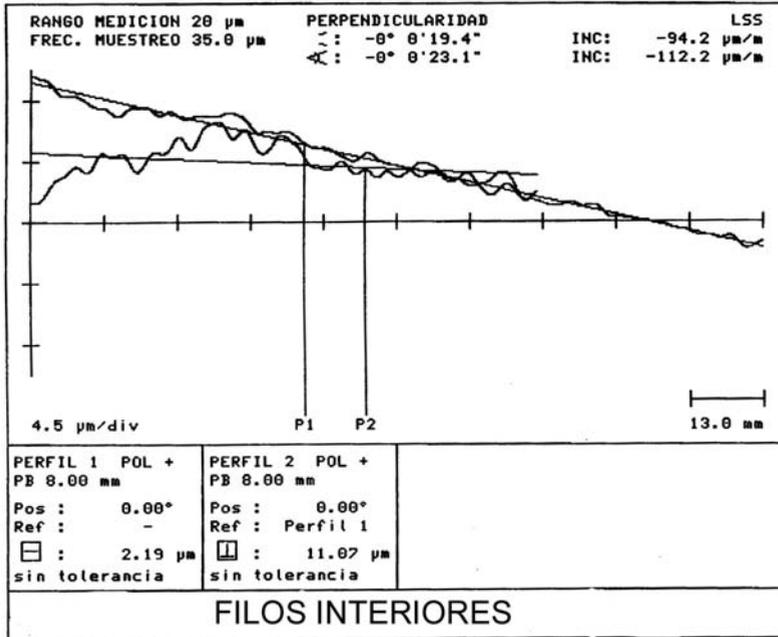


Figura 7: gráficos de las medidas de los fillos interiores

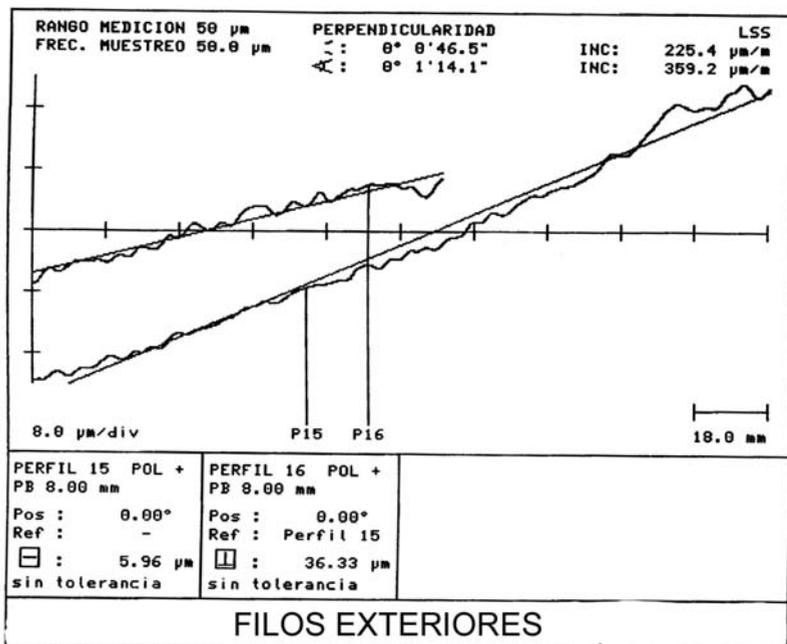


Figura 8: gráficos de las medidas de los fillos exteriores

