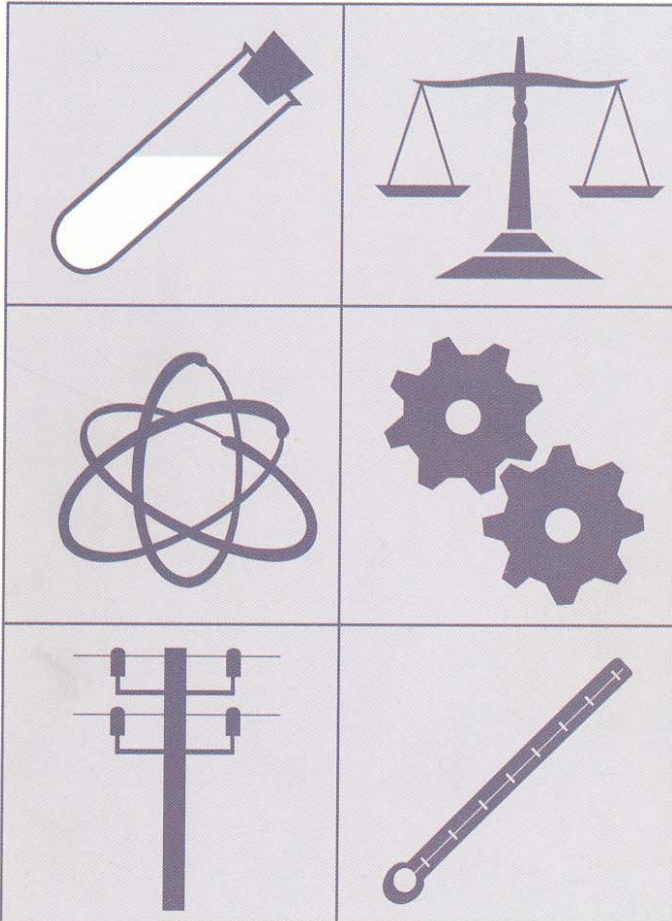


Metrología

PROCEDIMIENTO DE CALIBRACIÓN



PROCEDIMIENTO DI-018 PARA LA CALIBRACIÓN DE PATRONES REDONDEZ

m 10



GOBIERNO DE ESPAÑA

MINISTERIO DE INDUSTRIA, TURISMO Y COMERCIO

CEM
CENTRO ESPAÑOL DE METROLOGÍA

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
Patrón de redondez de bisel (Figura 1)	6
Patrón de redondez de casquete esférico (Figura 2)	7
Patrón de redondez de cilindro inclinado (Figura 3).....	7
4. GENERALIDADES	8
5. DESCRIPCIÓN	16
5.1. Calibración de patrones de redondez del tipo de casquete esférico, con medidora de redondez.....	16
5.2. Calibración de patrones de redondez de bisel, con medidora de una coordenada horizontal	20
5.3. Calibración de patrones de redondez de cilindro inclinado, con medidora de una coordenada horizontal y proyector de perfiles o medidora de tres coordenadas con plato divisor de trazos	24
6. RESULTADOS.....	28
6.1. Cálculo de incertidumbres.....	28
6.2. Interpretación de resultados.....	40
7. REFERENCIAS	41
8. ANEXOS: EJEMPLOS DE APLICACIÓN DEL PROCEDIMIENTO DESCRITO	43



ANEXO 1: CALIBRACIÓN DE PATRONES DE REDONDEZ DEL TIPO DE CASQUETE ESFÉRICO, CON MEDIDORA DE REDONDEZ.....	43
ANEXO 2: CALIBRACIÓN DE PATRONES DE REDONDEZ DE BISEL, CON MEDIDORA DE UNA COORDENADA HORIZONTAL.....	46
ANEXO 3: CALIBRACIÓN DE PATRONES DE REDONDEZ DE CILINDRO INCLINADO, CON MEDIDORA DE UNA COORDENADA HORIZONTAL Y PROYECTOR DE PERFILES, O MEDIDORA DE TRES COORDENADAS CON PLATO DIVISOR DE TRAZOS	50



1. OBJETO

El presente procedimiento de calibración tiene por objeto exponer algunos de los métodos posibles para la calibración de patrones de redondez codificados como D.07.01, 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 los patrones de redondez de los siguientes tipos: de casquete esférico, de bisel y de cilindro inclinado, cuya característica fundamental es que materializan en su superficie una determinada desviación de redondez, respecto a la forma ideal de una circunferencia.

3. DEFINICIONES

En el presente procedimiento se utilizará la terminología de la (ref. [2]) y las definiciones específicas que se indican a continuación.

Patrón de redondez de bisel (Figura 1):

Está constituido por una superficie cilíndrica sobre la que se mecaniza un bisel, montándose sobre una base metálica de apoyo.

Patrón de redondez de casquete esférico (Figura 2):

Está constituido por un casquete esférico, normalmente de vidrio pulido (aunque también los hay de acero y de cerámica), montado sobre una base metálica que le sirve de soporte.

Patrón de redondez de cilindro inclinado (Figura 3):

Está constituido por un cilindro inclinado respecto de su base de apoyo, con lo que su proyección es una elipse.

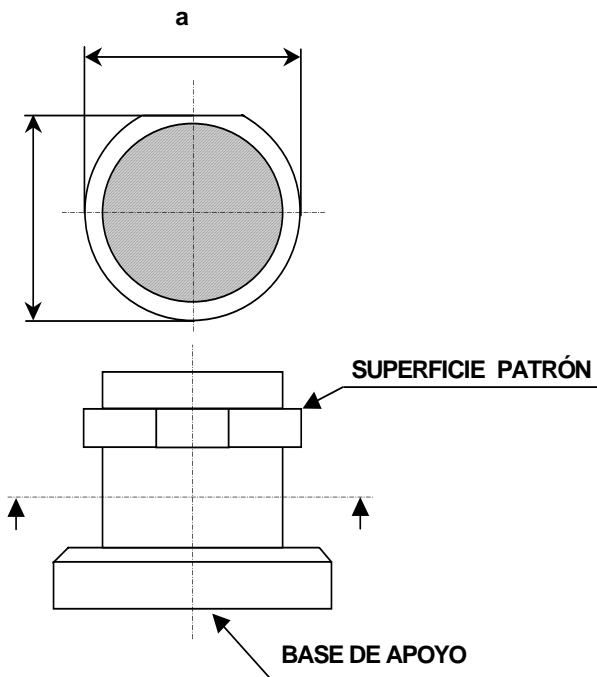


Figura 1: Patrón de redondez de bisel

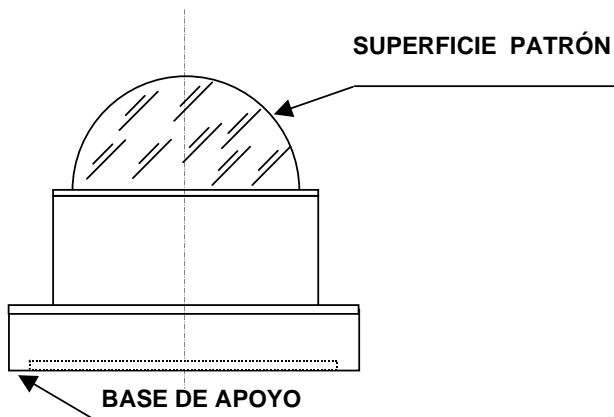


Figura 2: Patrón de redondez de casquete esférico

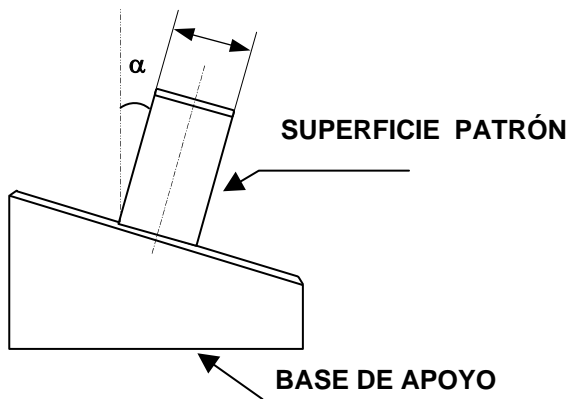


Figura 3: Patrón de redondez de cilindro inclinado



4. GENERALIDADES

Los patrones de redondez, cualquiera que sea su tipo, se caracterizan por materializar una desviación de redondez determinada con respecto a la forma ideal de una circunferencia.

Se utilizan fundamentalmente para la calibración de medidoras de redondez, pudiéndose utilizar también para la calibración de medidoras de tres coordenadas o de cualquier otro tipo de medidoras (siempre que éstas puedan realizar la medida de desviaciones de redondez).

Cada uno de los tipos de patrones de redondez mencionados se calibra habitualmente según el procedimiento que se indica a continuación.

Patrones de redondez de casquete esférico:

- Con medidora de redondez (D.07.02) (ref. [7]).

Patrones de redondez de bisel:

- Con máquina medidora de una coordenada horizontal (D.02.04) (ref. [7]).

Patrones de redondez de cilindro inclinado:

- Con máquina medidora de una coordenada horizontal (D.02.04) (ref. [7]) y proyector de perfiles (D.10.08) (ref. [7]), o
- Con medidora de tres coordenadas (D.02.07) (ref. [7]) y plato divisor de trazos (D.05.02) (ref. [7]).

El principio en el que se basa la calibración de los patrones de redondez del tipo de casquete esférico, es la medida absoluta de la desviación de redondez; el de los patrones de redondez de bisel, la medida indirecta de la desviación de redondez, calculada a partir de las medidas del diámetro en la parte cilíndrica y en la zona del bisel, y el de los patrones de redondez de cilindro inclinado, la medida indirecta de la desviación de redondez, calculada a partir de las medidas del diámetro del cilindro y del ángulo que forma con su base.



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

M1C: Medidora de una coordenada horizontal.

M3C: Medidora de tres coordenadas.

MR: Medidora de redondez.

PD: Plato divisor.

PP: Proyector de perfiles.

PR: Patrón de redondez de cualquier tipo.

PRB: Patrón de redondez de bisel.

PRC: Patrón de redondez de casquete esférico.

PRI: Patrón de redondez de cilindro inclinado.

En este documento, se utilizarán los símbolos que a continuación se relacionan:

\bar{a} = Media aritmética de las lecturas de la M1C del diámetro del PRB.

a_i = Lectura de orden i del diámetro a (figura 1) del PRB.

\bar{b} = Media aritmética de las lecturas de la M1C de la distancia b del PRB.

b_i = Lectura de orden i de la distancia b (figura 1) sobre la superficie del bisel del PRB.

C_{dM} = Corrección por deriva de la M1C.



C_{dM_a} = Corrección por deriva de la M1C aplicada a a .

C_{dM_b} = Corrección por deriva de la M1C aplicada a b .

C_{dP} = Corrección por deriva del PP o del PD de la M3C desde su última calibración.

C_{dR} = Corrección por deriva de la MR desde su última calibración.

C_{EM} = Corrección por división de escala de la M1C.

C_{EM_a} = Corrección por división de escala de la M1C aplicada a a .

C_{EM_b} = Corrección por división de escala de la M1C aplicada a b .

C_{EP} = Corrección por división de escala del PP o del PD de la M3C.

C_{ER} = Corrección por división de escala de la MR.

C_{oM} = Corrección de calibración de la M1C obtenida del certificado de calibración de la misma.

C_{oM_a} = Corrección de calibración de la M1C obtenida del certificado de calibración de la misma, aplicada a a .

C_{oM_b} = Corrección de calibración de la M1C obtenida del certificado de calibración de la misma, aplicada a b .

C_{oP} = Corrección de calibración del PP o del PD de la M3C obtenida del certificado de calibración.

C_{oR} = Corrección de calibración de la MR para el filtro considerado, obtenida del certificado de calibración de la misma.



\bar{d} = Media aritmética de las lecturas del diámetro del PRI.

d_i = Lectura de orden i del diámetro d del PRI.

d_C = Diámetro d del PRI más las correcciones.

D_{M_i} = Desviación de la M1C en su certificado de calibración i .

$D_{M_{i-1}}$ = Desviación de la M1C en su certificado de calibración $i-1$.

D_{P_i} = Desviación del PP o del PD de la M3C en su certificado de calibración i .

$D_{P_{i-1}}$ = Desviación del PP o del PD de la M3C en su certificado de calibración $i-1$.

D_{R_i} = Desviación de la MR en su certificado de calibración i .

$D_{R_{i-1}}$ = Desviación de la MR en su certificado de calibración $i-1$.

E_M = División de escala de la M1C.

E_P = División de escala del PP o del PD de la M3C.

E_R = División de escala de la MR.

H_i = Altura del punto de calibración i .

k = Factor de cobertura.

N = Número de medidas realizadas.

opr = ondulaciones por revolución o vuelta.



s_a = Desviación típica de la media de las lecturas de la M1C del diámetro a del PRB.

s_{ap} = Desviación típica experimental de las lecturas de la M1C del diámetro a del PRB.

s_b = Desviación típica de la media de lecturas de la M1C de la distancia b del PRB

s_{bp} = Desviación típica experimental de las lecturas de la M1C de la distancia b del PRB.

s_d = Desviación típica de la media de las lecturas del diámetro d del PRI.

s_{dp} = Desviación típica experimental de las lecturas del diámetro d del PRI.

s_α = Desviación típica de la media de lecturas del ángulo α del PRI.

$s_{\alpha p}$ = Desviación típica experimental de las lecturas del ángulo α del PRI.

$s_{\Delta Z_{qik}}$ = Desviación típica experimental de las medidas de calibración del PRC.

$s_{\overline{\Delta Z}_{qik}}$ = Desviación típica de la media de las medidas de calibración del PRC.

u_a = Repetibilidad de las medidas de calibración del diámetro a del PRB.



- u_b = Repetibilidad de las medidas de calibración de la distancia b del PRB.
- u_d = Repetibilidad de las medidas de calibración del diámetro d del PRI.
- u_{d_c} = Incertidumbre típica del diámetro d_c del PRI.
- u_{dM} = Incertidumbre típica de la corrección por deriva de la M1C desde su última calibración.
- u_{dP} = Incertidumbre típica de la corrección por deriva desde su última calibración del PP o del PD de la M3C.
- u_{dR} = Incertidumbre típica de la corrección por deriva de la MR, desde su última calibración.
- u_{EM} = Incertidumbre típica de la corrección por división de escala de la M1C.
- u_{EM_a} = Incertidumbre típica de la corrección por división de escala de la M1C, aplicada a a .
- u_{EM_b} = Incertidumbre típica de la corrección por división de escala de la M1C, aplicada a b .
- u_{EP} = Incertidumbre típica de la corrección por división de escala del PP o del PD de la M3C.
- u_{ER} = Incertidumbre típica de la corrección por división de escala de la MR.
- U_{oM} = Incertidumbre expandida de la corrección de calibración de la M1C, obtenida del certificado de calibración de la misma.
- u_{oM} = Incertidumbre típica de la corrección de calibración de la M1C, obtenida del certificado de calibración de la misma.



U_{oP} = Incertidumbre expandida de la corrección de calibración del PP o del PD de la M3C, obtenida del certificado de calibración.

u_{oP} = Incertidumbre típica de la corrección de calibración del PP o del PD de la M3C, obtenida del certificado de calibración.

U_{oR} = Incertidumbre expandida de la corrección de calibración de la MR para el filtro considerado, obtenida del certificado de calibración de la misma.

u_{oR} = Incertidumbre típica de la corrección de calibración de la MR para el filtro considerado, obtenida del certificado de calibración de la misma.

u_{α} = Repetibilidad de las medidas de calibración del ángulo α del PRI.

u_{α_C} = Incertidumbre típica del ángulo α_C del PRI.

$u_{\Delta Z_{qB}}$ = Incertidumbre combinada de la desviación de redondez del PRB.

$u_{\Delta Z_{qI}}$ = Incertidumbre combinada de la desviación de redondez del PRI.

$u_{\Delta Z_{qk}}$ = Incertidumbre combinada de la desviación de redondez del PRC para un filtro dado.

$u_{\Delta Z_{qik}}$ = Repetibilidad de las medidas de calibración del PRC.

$\left(u_{\Delta Z_{qik}}\right)_M$ = Repetibilidad máxima de las medidas de calibración del PRC, en las distintas alturas medidas.



$U_{\Delta Z_{qB}}$ = Incertidumbre expandida de la desviación de redondez del PRB.

$U_{\Delta Z_{qI}}$ = Incertidumbre expandida de la desviación de redondez del PRI.

$U_{\Delta Z_{qk}}$ = Incertidumbre expandida de la desviación de redondez del PRC.

$\bar{\alpha}$ = Media aritmética de las lecturas del ángulo α del PRI.

α_C = Ángulo α del PRI más las correcciones.

α_i = Lectura de orden i del ángulo α que forma el cilindro con la base del PRI.

ΔZ_q = Desviación de redondez del perfil medido, en el sistema del círculo de los mínimos cuadrados (CMC).

ΔZ_{qB} = Desviación de redondez del PRB.

ΔZ_{qI} = Desviación de redondez del PRI.

ΔZ_{qijk} = Desviación de redondez j -ésima del PRC, en el punto i de calibración con el filtro k .

ΔZ_{qk} = Desviación de redondez del PRC para un filtro dado.

$\overline{\Delta Z_{qik}}$ = Media aritmética de las medidas de calibración del PRC, realizadas en el punto i y con el filtro k .

$(\Delta Z_{qik})_M$ = Máxima desviación de redondez para un filtro dado en las distintas alturas medidas.



V_{ef} = Grados efectivos de libertad.

5. DESCRIPCIÓN

Los patrones de redondez deben estar identificados al menos con un NÚMERO DE SERIE y si es posible además con la MARCA y el MODELO (ref. [9]).

En caso de que no exista alguno de los datos antes citados, se puede proceder a la identificación del PR de la mejor forma posible (por ejemplo mediante etiqueta fuertemente adherida al mismo sin que afecte a su operatividad, con un código de identificación único) de forma que no haya duda alguna entre el patrón calibrado y el correspondiente certificado de calibración emitido. Este código podrá ser el asignado por el usuario o, en su defecto, por el laboratorio de calibración.

Todos los patrones e instrumentos utilizados para esta calibración deberán tener trazabilidad.

5.1. Calibración de patrones de redondez del tipo casquete esférico, con medidora de redondez (D.07.02)

Este procedimiento es adecuado para la calibración de los PRC cualquiera que sea el material en que estén fabricados, vidrio, acero o cerámica.

En el presente procedimiento se va a contemplar la calibración de la desviación de redondez (ΔZ_q) del perfil medido del PRC, en el sistema del círculo de los mínimos cuadrados (CMC) (Ref. [10 y 11]). Este parámetro es el más utilizado, si se necesitara otro y la MR dispusiera de él, se realizaría la calibración de la misma forma que se indica en este apartado.

5.1.1. Equipos y materiales



Para la calibración se utilizará una MR con división de escala $E \leq 0,1 \mu\text{m}$ y que disponga de filtros normalizados según [10 y 11].

Un termómetro o un registrador de temperatura con división de escala $E \leq 1 \text{ }^\circ\text{C}$.

Como elementos auxiliares se utilizarán trapos y algún producto desengrasante, se suelen utilizar trapos de algodón y como desengrasante una mezcla de alcohol y éter al 50 %.

5.1.2. Operaciones previas

El PRC conviene que esté en el laboratorio donde se va a calibrar, al menos 24 horas antes de su calibración.

Limpiar el PRC a calibrar con un paño y algún producto desengrasante.

Realizar una inspección visual del PRC a calibrar, para comprobar que no presenta golpes, arañazos, o cualquier otro defecto que imposibilite su uso.

Encender la MR.

Colocar el PRC sobre el plato de la MR (ver figura 4).

Dejar que se establezca térmicamente el PRC, al menos durante 30 min.

Esta calibración es conveniente realizarla en salas de Metrología en las que se mantenga la temperatura en $20 \text{ }^\circ\text{C} \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$.

Centrar el PRC en el plato de la MR, siguiendo en cada caso las instrucciones del propio manual de la MR.

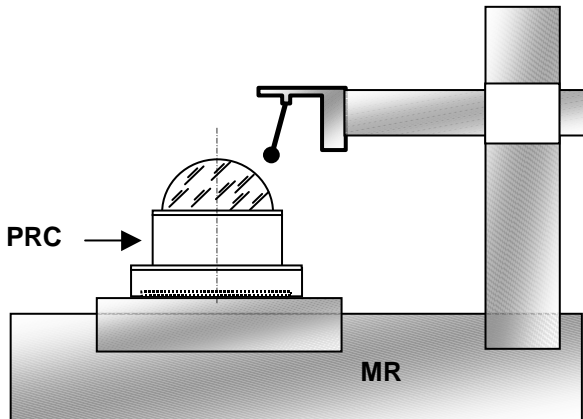


Figura 4: Montaje para la calibración del PRC

5.1.3. Proceso de Calibración

Es muy recomendable para esta calibración trabajar con un palpador esférico y con la menor fuerza de palpado posible.

Seleccionar en la MR uno de los filtros normalizados según la (ref. [10 y 11]) (15 opr, 50 opr, 150 opr, 500 opr o 1 500 opr).

NOTA:

opr = ondulaciones por revolución (en inglés, upr).

Poner en contacto el palpador de la MR con el PRC y realizar una medida de redondez.

Se recomienda reiterar las operaciones antes indicadas, para obtener diez medidas de redondez del PRC, retirando el palpador y volviéndolo a poner en contacto con el PRC entre cada una de las medidas.



Repetir las operaciones indicadas en los párrafos anteriores, a dos alturas distintas a la primera, de forma que se explore una zona del PRC de al menos 4 ó 5 mm.

Reiterar todas las operaciones citadas anteriormente para cada uno de los filtros normalizados de que disponga la MR.

5.1.4. Toma y tratamiento de datos

Al iniciar la calibración se debe tomar la lectura de temperatura a la que se encuentra el laboratorio; durante la misma, se toman los datos: H_i e ΔZ_{qijk} .

Se aplicará algún criterio de aceptación o rechazo de las medidas realizadas, bien sea de tipo estadístico (Ej. Chauvenet) o basado en las experiencia del jefe del laboratorio.

Calcular la media aritmética de las medidas realizadas en cada altura del PRC, para cada uno de los filtros empleados, según la ecuación siguiente:

$$\overline{\Delta Z}_{qik} = \frac{\sum_{j=1}^N \Delta Z_{qijk}}{N}$$

Calcular la desviación típica experimental de las medidas de calibración del PRC, según la ecuación siguiente:

$$s_{\Delta Z_{qik}} = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^N (\Delta Z_{qijk} - \overline{\Delta Z}_{qik})^2}{N - 1}}$$

Calcular la desviación típica de la media de las medidas de calibración del PRC, según la ecuación siguiente:



$$S_{\overline{\Delta Z}_{qik}} = \frac{S_{\Delta Z_{qik}}}{\sqrt{N}}$$

Calcular la desviación de redondez del PRC para cada filtro mediante la siguiente ecuación:

$$\Delta Z_{qk} = (\overline{\Delta Z}_{qik})_M + C_{oR} + C_{dR} + C_{ER}$$

La única magnitud de influencia a considerar en esta calibración es la temperatura. No es necesario realizar correcciones por temperatura, siempre que las condiciones ambientales de la sala se mantengan dentro del intervalo de temperaturas indicado en el párrafo 5.1.2.

5.2. Calibración de patrones de redondez de bisel, con medidora de una coordenada horizontal (D-02.04)

Si se dispone de una MR cuyo campo de medida sea mayor que la desviación de redondez del PRB a calibrar, se recomienda seguir el procedimiento indicado en el punto 5.1. Si el campo de la MR disponible es menor que la desviación de redondez del PRB a calibrar, usar el procedimiento que a continuación se indica, el cual se considera sustitutorio del indicado en el apartado 5.1.

5.2.1. Equipos y materiales

Para la calibración se utilizarán los equipos que se indican a continuación:

Medidora de una coordenada horizontal, con división de escala $E \leq 0,001$ mm.

Un termómetro o un registrador de temperatura con división de escala $E \leq 1$ °C.

Como elementos auxiliares se utilizarán: trapos y algún producto desengrasante, se suelen utilizar trapos de

algodón y como desengrasante una mezcla de alcohol y éter al 50 %.

5.2.2. Operaciones previas

El PRB conviene que esté en el laboratorio donde se va a calibrar, al menos 24 horas antes de su calibración.

Colocar los palpadores de la M1C en contacto y poner el indicador de lecturas en 0.

Limpiar el PRB a calibrar y los palpadores de la M1C, con un paño y algún producto desengrasante.

Realizar una inspección visual del PRB a calibrar, para comprobar que no presenta golpes, arañazos, o cualquier otro defecto que imposibilite su uso.

Encender la M1C y colocarle los palpadores de puntas finas si se dispone de ellos.

Colocar el PRB sobre la mesa de la M1C (ver figura 5).

Dejar que se establezca térmicamente el PRB y la M1C, al menos durante 30 min.

Esta calibración es conveniente realizarla en salas de Metrología en las que se mantenga la temperatura en $20 \text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

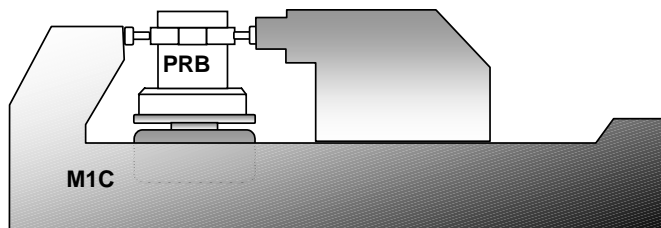


Figura 5: Montaje para la calibración del PRB



5.2.3. Proceso de Calibración

Medir el diámetro a y la distancia b sobre la superficie del bisel del patrón (ver Figura 1). Se recomienda obtener diez medidas de las dos distancias indicadas.

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; durante la misma se tomarán las lecturas de los diámetros a_i y las distancias b_i .

Se aplicará algún criterio de aceptación o rechazo de las medidas realizadas, bien sea de tipo estadístico (Ej. Chauvenet) o basado en las experiencia del jefe del laboratorio.

Calcular la media aritmética de las lecturas a_i y b_i del PRB según las ecuaciones siguientes:

$$\bar{a} = \frac{\sum_{i=1}^N a_i}{N}$$

$$\bar{b} = \frac{\sum_{i=1}^N b_i}{N}$$

Calcular la desviación típica experimental de las lecturas realizadas con la M1C, según las ecuaciones siguientes:



$$s_{ap} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (a_i - \bar{a})^2}{N - 1}}$$

$$s_{bp} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (b_i - \bar{b})^2}{N - 1}}$$

Calcular la desviación típica de la media de las lecturas de la M1C, según las ecuaciones siguientes:

$$s_{\bar{a}} = \frac{s_{ap}}{\sqrt{N}}$$

$$s_{\bar{b}} = \frac{s_{bp}}{\sqrt{N}}$$

Calcular la desviación de redondez del patrón mediante la ecuación siguiente:

$$\Delta Z_{qB} = \bar{a} + C_{oM_a} + C_{dM_a} + C_{EM_a} - (\bar{b} + C_{oM_b} + C_{dM_b} + C_{EM_b})$$

La única magnitud de influencia a considerar en esta calibración es la temperatura. No es necesario realizar correcciones por temperatura, siempre que las condiciones ambientales de la sala se mantengan dentro del intervalo de temperaturas indicado en el párrafo 5.2.2.



5.3. Calibración de patrones de redondez de cilindro inclinado, con medidora de una coordenada horizontal (D.02.04) y proyector de perfiles (D.10.08), o medidora de tres coordenadas (D.02.07) y plato divisor de trazos (D.05.02)

Si se dispone de una MR cuyo campo de medida sea mayor que la desviación de redondez del PRI a calibrar, se recomienda seguir el procedimiento indicado en el punto 5.1. Si el campo de la MR disponible es menor que la desviación de redondez del PRI a calibrar, usar el procedimiento que a continuación se indica, el cual se considera sustitutorio del indicado en el apartado 5.1.

El diámetro d del PRI se mide siempre con la M1C, el ángulo α , se puede medir indistintamente con el PP o con la M3C y el PD, siendo el procedimiento y tratamiento posterior de los datos muy similar.

5.3.1. Equipos y materiales

Para la calibración se utilizarán los equipos que se indican a continuación:

Medidora de una coordenada horizontal, con división de escala $E \leq 0,001$ mm, proyector de perfiles con división de escala angular $E \leq 1'$ o medidora de tres coordenadas de división de escala $E \leq 5$ μm , con plato divisor de división de escala $E \leq 1'$.

Un termómetro o un registrador de temperatura con división de escala $E \leq 1$ °C.

Como elementos auxiliares se utilizarán: una mesa de nivelación, trapos y algún producto desengrasante, se suelen utilizar trapos de algodón y como desengrasante una mezcla de alcohol y éter al 50 %.



5.3.2. Operaciones previas

El PRI conviene que esté en el laboratorio donde se va a calibrar, al menos 24 horas antes de su calibración.

Limpiar el PRI a calibrar y los palpadores de la M1C y de la M3C si se va a usar, con un paño y algún producto desengrasante.

Realizar una inspección visual del PRI a calibrar, para comprobar que no presenta golpes, arañazos, o cualquier otro defecto que imposibilite su uso.

Encender la M1C y colocarle los palpadores de puntas finas si se dispone de ellos.

Colocar los palpadores de la M1C en contacto y poner el indicador de lecturas en 0.

Colocar el PRI sobre la mesa auxiliar de nivelación y el conjunto sobre la mesa de la M1C (ver Figura 6).

Nivelar el PRI con la mesa auxiliar, de forma que el eje del cilindro, quede perpendicular a los palpadores de la M1C.

Dejar que se establezca térmicamente el PRI y la M1C, al menos durante 30 min.

Conectar el PP o la M3C, y dejar que se establezca térmicamente durante 30 min.

Esta calibración es conveniente realizarla en salas de Metrología en las que se mantenga la temperatura en $20\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$.

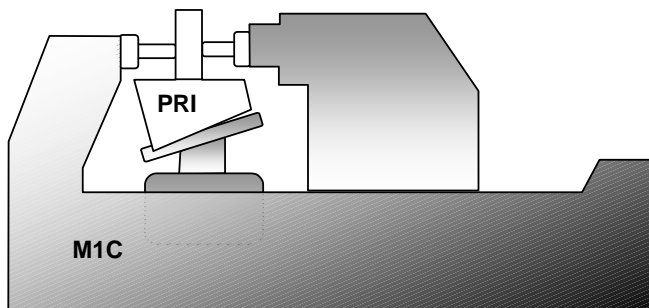


Figura 6: Montaje para la calibración del PRI

5.3.3. Proceso de Calibración

Medir el diámetro d con la M1C (ver Figura 3). Se recomienda obtener diez medidas del diámetro indicado.

Colocar el PRI, sobre la mesa del PP o sobre el PD de la M3C.

Medir el ángulo α (ver Figura 3) con cualquiera de los instrumentos citados en el párrafo anterior; se recomienda obtener diez medidas del ángulo. Para la realización de estas medidas, seguir lo indicado en el correspondiente manual de instrucciones del instrumento utilizado (PP ó PD).

5.3.4. Toma y tratamiento de datos

Al iniciar la calibración se debe tomar la lectura de temperatura a la que se encuentra el laboratorio; durante la misma se tomarán las lecturas de los diámetros d_i y de los ángulos α_i .

Se aplicará algún criterio de aceptación o rechazo de las medidas realizadas, bien sea de tipo estadístico (Ej. Chauvenet) o basado en las experiencia del jefe del laboratorio.



Calcular la media aritmética de las lecturas d_i y α_i , según las ecuaciones siguientes:

$$\bar{d} = \frac{\sum_{i=1}^N d_i}{N}$$

$$\bar{\alpha} = \frac{\sum_{i=1}^N \alpha_i}{N}$$

Calcular la desviación típica experimental de las lecturas realizadas, según las ecuaciones siguientes:

$$s_{dp} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (d_i - \bar{d})^2}{N - 1}}$$

$$s_{\alpha p} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\alpha_i - \bar{\alpha})^2}{N - 1}}$$

Calcular la desviación típica de la media de las lecturas del diámetro y del ángulo del PRI, según las ecuaciones siguientes:

$$s_{\bar{d}} = \frac{s_{dp}}{\sqrt{N}}$$

$$s_{\bar{\alpha}} = \frac{s_{\alpha p}}{\sqrt{N}}$$



Calcular la desviación de redondez del patrón mediante la ecuación siguiente:

$$\Delta Z_{qI} = \frac{d_c}{2} \left(\frac{1}{\cos \alpha_c} - 1 \right)$$

La única magnitud de influencia a considerar en esta calibración es la temperatura. No es necesario realizar correcciones por temperatura, siempre que las condiciones ambientales de la sala se mantengan dentro del intervalo de temperaturas indicado en el párrafo 5.3.2.

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 indica la forma de realizar el cálculo de incertidumbre, para cada uno de los procedimientos expuestos anteriormente.

6.1.1. Calibración de patrones de redondez del tipo casquete esférico, con medidora de redondez

La desviación de redondez del PRC para un filtro dado viene dada por la expresión del apartado 5.1.4:

$$\Delta Z_{qk} = (\overline{\Delta Z_{qk}})_M + C_{oR} + C_{dR} + C_{ER}$$

Aplicando la ley de propagación de la incertidumbre y considerando que todas las magnitudes de entrada son independientes, resulta:



$$u_{\Delta Z_{qk}} = \sqrt{u_{(\overline{\Delta Z}_{qik})_M}^2 + u_{oR}^2 + u_{dR}^2 + u_{ER}^2}$$

La repetibilidad de las medidas de calibración, es igual a la desviación típica de la media calculada en el apartado 5.1.4, tomándose la que resulte mayor de las medidas realizadas a distintas alturas.

La corrección de calibración (C_{oR}) y la incertidumbre típica (u_{oR}) de la MR, se obtienen del certificado de calibración de la misma:

$$u_{oR} = \frac{U_{oR}}{k}$$

La corrección por deriva de la MR (C_{dR}) se introduce considerando una corrección de media nula, con distribución uniforme de semiamplitud $\left| D_{R_i} - D_{R_{i-1}} \right|$ (este valor se obtiene de los dos certificados de calibraciones precedentes consecutivas de la MR, que den lugar a una mayor diferencia entre desviaciones), en consecuencia su desviación típica es:

$$u_{dR} = \frac{\left| D_{R_i} - D_{R_{i-1}} \right|}{\sqrt{3}}$$

La corrección por división de escala de la MR, se introduce con una corrección de media nula y distribución rectangular de semiamplitud $E_R/2$, su desviación típica viene dada por la ecuación siguiente:

$$u_{ER} = \frac{E_R}{\sqrt{12}}$$

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



Magnitud X_i	Estimación X_i	Incertidumbre típica $u(x_i)$	Distribución de probabilidad	Coefficiente de sensibilidad c_i	Contribución a la incertidumbre $u_i(y)$
$(\overline{\Delta Z}_{qik})_M$	$(\overline{\Delta Z}_{qik})_M$	$\left(\frac{S_{\Delta Z_{qik}}}{\sqrt{N}} \right)_M$	normal	1	$\left(\frac{S_{\Delta Z_{qik}}}{\sqrt{N}} \right)_M$
C_{oR}	C_{oR}	$\frac{U_{oR}}{k}$	normal	1	$\frac{U_{oR}}{k}$
C_{dr}	0	$\frac{ D_{R_i} - D_{R_{i-1}} }{\sqrt{3}}$	rectangular	1	$\frac{ D_{R_i} - D_{R_{i-1}} }{\sqrt{3}}$
C_{ER}	0	$\frac{E_R}{\sqrt{12}}$	rectangular	1	$\frac{E_R}{\sqrt{12}}$
ΔZ_{qk}	ΔZ_{qk}	Incertidumbre típica combinada ($u_{\Delta Z_{qk}}$)			$u_{\Delta Z_{qk}} = \sqrt{\sum u_i^2(y)}$
Incertidumbre expandida ($U_{\Delta Z_{qk}}$)					$U_{\Delta Z_{qk}} = k \cdot u$

Tabla 1: Contribuciones a la incertidumbre combinada en la calibración de un PRC con MR

La incertidumbre expandida queda por tanto:

$$U_{\Delta Z_{qk}} = k \cdot \sqrt{\left(\frac{S_{\Delta Z_{qik}}}{\sqrt{N}} \right)_M^2 + \frac{U_{oR}^2}{k^2} + \frac{|D_{R_i} - D_{R_{i-1}}|^2}{3} + \frac{E_R^2}{12}}$$



Dado que en la mayor parte de los casos, las contribuciones con una distribución de probabilidad normal serán las que tienen más peso, el factor de cobertura k será igual a 2, de no ser así se calculan los grados efectivos de libertad mediante la ecuación de Welch-Satterthwaite (ref. [5]), la cual en este caso sería:

$$v_{ef} = \frac{u_{\Delta Z_{qk}}^4}{\left(\frac{S_{\Delta Z_{qik}}}{\sqrt{N}} \right)^4 \frac{N-1}{N-1}}$$

Una vez conocidos los grados efectivos de libertad, entrando en la tabla de la citada (ref. [5]), se obtiene el valor de k .

6.1.2. Calibración de patrones de redondez de bisel con medidora de una coordenada horizontal

La desviación de redondez del PRB viene dada por la expresión del apartado 5.2.4:

$$\Delta Z_{qB} = \bar{a} + C_{oM_a} + C_{dM_a} + C_{EM_a} - (\bar{b} + C_{oM_b} + C_{dM_b} + C_{EM_b})$$

Teniendo en cuenta que $a \approx b$, pues difieren del orden de algunos micrómetros y que las M1C no se calibran en rangos tan pequeños, resulta:

$$C_{oM_a} \approx C_{oM_b} \quad \text{y} \quad C_{dM_a} \approx C_{dM_b}$$

Por tanto la ecuación queda de la forma siguiente:

$$\Delta Z_{qB} = \bar{a} - \bar{b} + C_{EM_a} - C_{EM_b}$$



Aplicando la ley de propagación de incertidumbres y considerando que las parejas de variables: a y b , C_{oM_a} y C_{oM_b} , y C_{dM_a} y C_{dM_b} están correlacionadas, siendo su coeficiente de correlación prácticamente 1, resulta:

$$u_{\Delta Z_{qB}} = \sqrt{u_a^2 + u_b^2 + u_{EM_a}^2 + u_{EM_b}^2}$$

La repetibilidad (u_a) de las medidas de calibración del diámetro a , es igual a la desviación típica de la media calculada en el apartado 5.2.4.

La repetibilidad (u_b) de las medidas de calibración de la distancia b , es igual a la desviación típica de la media calculada en el apartado 5.2.4.

La corrección por división de escala de la M1C se introduce con una corrección de media nula y distribución rectangular de semiamplitud $E_M/2$, puesto que tanto a como b se obtienen como diferencia de dos lecturas; sus desviaciones típicas vendrán dadas por las expresiones:

$$u_{EM_a} = \frac{E_M}{\sqrt{6}}$$

$$u_{EM_b} = \frac{E_M}{\sqrt{6}}$$

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



Magnitud X_i	Estimación x_i	Incertidumbre típica $u(x_i)$	Distribución de probabilidad	Coefficiente de sensibilidad c_i	Contribución a la incertidumbre $u_i(y)$
a	a	$\frac{s_{ap}}{\sqrt{N}}$	normal	1	$\frac{s_{ap}}{\sqrt{N}}$
b	b	$\frac{s_{bp}}{\sqrt{N}}$	normal	-1	$-\frac{s_{bp}}{\sqrt{N}}$
C_{EM_a}	0	$\frac{E_M}{\sqrt{6}}$	triangular	1	$\frac{E_M}{\sqrt{6}}$
C_{EM_b}	0	$\frac{E_M}{\sqrt{6}}$	triangular	-1	$-\frac{E_M}{\sqrt{6}}$
ΔZ_{qB}	ΔZ_{qB}	Incertidumbre típica combinada ($u_{\Delta Z_{qB}}$)			$u_{\Delta Z_{qB}} = \sqrt{\sum u_i^2(y)}$
		Incertidumbre expandida ($U_{\Delta Z_{qB}}$)			$U_{\Delta Z_{qB}} = k \cdot u$

Tabla 2: Contribuciones a la incertidumbre combinada en la calibración de un PRB con M1C

La incertidumbre expandida queda por tanto:

$$U_{\Delta Z_{qB}} = k \cdot \sqrt{\frac{s_{ap}^2}{N} + \frac{s_{bp}^2}{N} + \frac{E_M^2}{6} + \frac{E_M^2}{6}}$$

Dado que en la mayor parte de los casos, las contribuciones con una distribución de probabilidad normal serán las que tienen más peso, el factor de cobertura k será igual a 2, de no ser así se



calculan los grados efectivos de libertad mediante la ecuación de Welch-Satterthwaite (ref. [5]), la cual en este caso sería:

$$v_{ef} = \frac{u_{\Delta Z_{qB}}^4}{\frac{\left(\frac{S_{ap}}{\sqrt{N}}\right)^4}{N-1} + \frac{\left(\frac{S_{bp}}{\sqrt{N}}\right)^4}{N-1}}$$

6.1.3. Calibración de patrones de redondez de cilindro inclinado con medidora de una coordenada horizontal y proyector de perfiles, o medidora de tres coordenadas y plato divisor

La desviación de redondez del PRI para un filtro dado viene dada por la expresión del apartado 5.3.4.

$$\Delta Z_{qI} = \frac{d_c}{2} \left(\frac{1}{\cos \alpha_c} - 1 \right)$$

Aplicando la ley de propagación de incertidumbres y considerando que todas las magnitudes de entrada son independientes, resulta:

$$u_{\Delta Z_{qI}} = \sqrt{\left(\frac{1}{2 \cdot \cos \alpha_c} - \frac{1}{2} \right)^2 \cdot u_{d_c}^2 + \left(\frac{d_c \cdot \operatorname{sen} \alpha_c}{2 \cdot \cos^2 \alpha_c} \right)^2 \cdot u_{\alpha_c}^2}$$

El diámetro d_c viene dado por la siguiente expresión:

$$d_c = \bar{d} + C_{oM} + C_{dM} + C_{EM}$$

El ángulo α_c viene dado por la siguiente expresión:

$$\alpha_c = \bar{\alpha} + C_{oP} + C_{dP} + C_{EP}$$



Aplicando la ley de propagación de incertidumbres a estas dos últimas expresiones resulta:

$$u_{d_c} = \sqrt{u_d^2 + u_{oM}^2 + u_{dM}^2 + u_{EM}^2}$$

$$u_{\alpha_c} = \sqrt{u_{\alpha}^2 + u_{oP}^2 + u_{dP}^2 + u_{EP}^2}$$

Sustituyendo estas dos últimas ecuaciones en la ecuación de $u_{\Delta Z_{ql}}$, resulta:

$$u_{\Delta Z_{ql}} = \sqrt{\left(\frac{1}{2 \cdot \cos \alpha_C} - \frac{1}{2} \right)^2 \cdot (u_d^2 + u_{oM}^2 + u_{dM}^2 + u_{EM}^2) + \left(\frac{d_C \cdot \text{sen } \alpha_C}{2 \cdot \cos^2 \alpha_C} \right)^2 \cdot (u_{\alpha}^2 + u_{oP}^2 + u_{dP}^2 + u_{EP}^2)}$$

La repetibilidad de las medidas de calibración (u_d) del diámetro d , es igual a la desviación típica de la media calculada en el apartado 5.3.4.

La corrección de calibración (C_{oM}) y la incertidumbre típica (u_{oM}) de la M1C, se obtienen del certificado de calibración de la misma.

$$u_{oM} = \frac{U_{oM}}{k}$$

La corrección por deriva de la M1C (C_{dM}) se introduce considerando una corrección de media nula, con distribución uniforme de semiamplitud $\left| D_{M_i} - D_{M_{i-1}} \right|$ (este valor se obtiene de los dos certificados de calibraciones precedentes consecutivas de la M1C, que den lugar a una mayor diferencia entre desviaciones), en consecuencia su desviación típica es:



$$u_{dM} = \frac{|D_{M_i} - D_{M_{i-1}}|}{\sqrt{3}}$$

La corrección por división de escala de la M1C se introduce con una corrección de media nula y distribución rectangular de semiamplitud $E_M/2$, puesto que d se obtiene como diferencia de dos lecturas y la convolución de dos distribuciones rectangulares es una distribución triangular, su desviación típica viene dada por la ecuación siguiente:

$$u_{EM} = \frac{E_M}{\sqrt{6}}$$

La repetibilidad de las medidas de calibración (u_α) del ángulo α , es igual a la desviación típica de la media calculada en el apartado 5.3.4.

La corrección de calibración (C_{oP}) y la incertidumbre típica (u_{oP}) del PP o del PD de la M3C, se obtienen de su correspondiente certificado de calibración.

$$u_{oP} = \frac{U_{oP}}{k}$$

La corrección por deriva del PP o del PD de la M3C (C_{dP}) se introduce considerando una corrección de media nula, con distribución uniforme de semiamplitud $|D_{P_i} - D_{P_{i-1}}|$ (este valor se obtiene de los dos certificados de calibraciones precedentes consecutivas del PP o del PD de la M3C, que den lugar a una mayor diferencia entre desviaciones), en consecuencia su desviación típica es:



$$u_{dP} = \frac{|D_{P_i} - D_{P_{i-1}}|}{\sqrt{3}}$$

La corrección por división de escala del PP o del PD de la M3C se introduce con una corrección de media nula y distribución rectangular de semiapertura $E_P/2$, puesto que α se obtiene como diferencia de dos lecturas y la convolución de dos distribuciones rectangulares es una distribución triangular, su desviación típica viene dada por la ecuación siguiente:

$$u_{EP} = \frac{E_P}{\sqrt{6}}$$

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



Magnitud X_i	Estimación x_i	Incertidumbre típica $u(x_i)$	Distribución de probabilidad	Coefficiente de sensibilidad c_i	Contribución a la incertidumbre $u_i(y)$
d	d	$\frac{S_{dp}}{\sqrt{N}}$	normal	1	$\frac{S_{dp}}{\sqrt{N}}$
C _{oM}	C _{oM}	$\frac{U_{oM}}{k}$	normal	1	$\frac{U_{oM}}{k}$
C _{dM}	0	$\frac{ D_{M_i} - D_{M_{i-1}} }{\sqrt{3}}$	rectangular	1	$\frac{ D_{M_i} - D_{M_{i-1}} }{\sqrt{3}}$
C _{EM}	0	$\frac{E_M}{\sqrt{6}}$	triangular	1	$\frac{E_M}{\sqrt{6}}$
d_c	$d_c = \sum x_i$	Incertidumbre típica combinada (u_{d_c})			$u_{d_c} = \sqrt{\sum u_i^2(y)}$
α	α	$\frac{S_{\alpha p}}{\sqrt{N}}$	normal	1	$\frac{S_{\alpha p}}{\sqrt{N}}$
C _{oP}	C _{oP}	$\frac{U_{oP}}{k}$	normal	1	$\frac{U_{oP}}{k}$
C _{dP}	0	$\frac{ D_{P_i} - D_{P_{i-1}} }{\sqrt{3}}$	rectangular	1	$\frac{ D_{P_i} - D_{P_{i-1}} }{\sqrt{3}}$
C _{EP}	0	$\frac{E_P}{\sqrt{6}}$	triangular	1	$\frac{E_P}{\sqrt{6}}$
α_c	$\alpha_c = \sum x_i$	Incertidumbre típica combinada (u_{α_c})			$u_{\alpha_c} = \sqrt{\sum u_i^2(y)}$
d_c	d_c	(1)	normal	$\frac{1}{2 \cdot \cos \alpha_c} - \frac{1}{2}$	(3)
α_c	α_c	(2)	normal	$\frac{d_c \cdot \operatorname{sen} \alpha_c}{2 \cdot \cos^2 \alpha_c}$	(4)
ΔZ_{qt}	ΔZ_{qt}	Incertidumbre típica combinada ($u_{\Delta Z_{qt}}$)			$u_{\Delta Z_{qt}} = \sqrt{\sum u_i^2(y)}$
		Incertidumbre expandida ($U_{\Delta Z_{qt}}$)			$U_{\Delta Z_{qt}} = k \cdot u$

Tabla 3: Contribuciones a la incertidumbre combinada en la calibración de un PRI con M1C y PP o PD

$$u_{d_c} = \sqrt{\frac{s_{dP}^2}{N} + \frac{U_{oM}^2}{k^2} + \frac{|D_{M_i} - D_{M_{i-1}}|^2}{3} + \frac{E_M^2}{6}} \quad (1)$$

$$u_{\alpha_c} = \sqrt{\frac{s_{\alpha P}^2}{N} + \frac{U_{oP}^2}{k^2} + \frac{|D_{P_i} - D_{P_{i-1}}|^2}{3} + \frac{E_P^2}{6}} \quad (2)$$

$$\sqrt{\left(\frac{1}{2 \cdot \cos \alpha} - \frac{1}{2}\right)^2 \cdot \left(\frac{s_{dP}^2}{N} + \frac{U_{oM}^2}{k^2} + \frac{|D_{M_i} - D_{M_{i-1}}|^2}{3} + \frac{E_M^2}{6}\right)} \quad (3)$$

$$\sqrt{\left(\frac{d \cdot \sin \alpha}{2 \cdot \cos^2 \alpha}\right)^2 \cdot \left(\frac{s_{\alpha P}^2}{N} + \frac{U_{oP}^2}{k^2} + \frac{|D_{P_i} - D_{P_{i-1}}|^2}{3} + \frac{E_P^2}{6}\right)} \quad (4)$$

La incertidumbre expandida queda por tanto:

$$U_{\Delta Z_{qt}} = k \cdot \left(\left(\frac{1}{2 \cdot \cos \alpha} - \frac{1}{2} \right)^2 \cdot \left(\frac{s_{dP}^2}{N} + \frac{U_{oM}^2}{k^2} + \frac{|D_{M_i} - D_{M_{i-1}}|^2}{3} + \frac{E_M^2}{6} \right) + \left(\frac{d \cdot \sin \alpha}{2 \cdot \cos^2 \alpha} \right)^2 \cdot \left(\frac{s_{\alpha P}^2}{N} + \frac{U_{oP}^2}{k^2} + \frac{|D_{P_i} - D_{P_{i-1}}|^2}{3} + \frac{E_P^2}{6} \right) \right)^{\frac{1}{2}}$$

Dado que en la mayor parte de los casos, las contribuciones con una distribución de probabilidad normal serán las que tienen más peso, el factor de cobertura k será igual a 2, de no ser así se calculan los grados



efectivos de libertad mediante la ecuación de Welch-Satterthwaite (ref. [5]), la cual en este caso sería:

$$V_{ef} = \frac{u_{NZ_{qt}}^4}{\left[\left(\frac{1}{2 \cdot \cos \alpha} - \frac{1}{2} \right) \cdot \frac{s_{dp}}{\sqrt{N}} \right]^4 + \left[\left(\frac{d \cdot \sin \alpha}{2 \cdot \cos^2 \alpha} \right) \cdot \frac{s_{cp}}{\sqrt{N}} \right]^4} \cdot (N-1)$$

6.2. Interpretación de resultados

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, para una probabilidad del 95 %, el factor de cobertura k será igual a 2.

En determinados casos en los que alguna contribución de incertidumbre sea dominante sobre las demás y su distribución no sea normal, sería necesario calcular la distribución que corresponde al resultado de la calibración y su correspondiente factor de cobertura para una probabilidad del 95 %.

Habitualmente se realizan los cálculos con una o dos cifras decimales más de la división de escala del instrumento utilizado, redondeando al final, según la (ref. [3]), el valor de la desviación de redondez y su incertidumbre a un múltiplo entero de la división de escala del citado instrumento.

En los certificados de calibración de laboratorios acreditados, como mínimo debe figurar, de acuerdo con lo establecido en la (ref. [10]), la desviación de redondez del patrón y la incertidumbre expandida de la misma con su correspondiente factor de cobertura k .

6.2.1. Períodos de recalibración



A título orientativo, se considera adecuado recalibrar los patrones de redondez cada 36 meses.

En cualquier caso este período es una mera recomendación, siendo el usuario de los PR quien debe fijar el valor que considere oportuno.

El período de recalibración antes indicado, se debería 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.).
- Cuando se necesiten requisitos especiales de seguridad (Defensa, Sanidad, Justicia, etc.).

Siempre debe procederse a una recalibración de los PR, cuando los resultados que se estén obteniendo hagan dudar al usuario del correcto estado de los mismos.

7. REFERENCIAS

- [1] Procedimiento para la elaboración de procedimientos de calibración. Grupo de Trabajo MINER-CEM. Ed. 2, Tres Cantos, Madrid. Año 2000.
- [2] Vocabulario Internacional de Metrología. Conceptos fundamentales y generales y términos asociados, 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, 1995,. Suiza, ISBN 92-67-10188-9.



- [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] EA-4/02 Expression of the Uncertainty of Measurement in Calibration. 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-048 para patrones de redondez D-07.01. Dirección General de Política Tecnológica del Ministerio de Industria, Comercio y Turismo. Sistema de Calibración Industrial (SCI), Edición inicial Diciembre de 1992.
- [9] Criterios específicos de acreditación. Elaboración de certificados de calibración. CEA-ENAC-LC/01, Rev. 3, Entidad Nacional de Acreditación (ENAC), Febrero 1998.
- [10] Norma UNE 82-307-94 Medidoras de redondez y de perfiles curvos (parcialmente equivalente a ISO 6318-1985). Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR), 12 páginas, 1994, Madrid.
- [11] Norma UNE 82 320 Diciembre 1995. Métodos para la evaluación de las desviaciones de redondez. Medición de las variaciones del radio. Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR), 27 páginas, 1995, Madrid.



8. ANEXOS: EJEMPLOS DE APLICACIÓN DEL PROCEDIMIENTO DESCRITO

ANEXO I: CALIBRACIÓN DE PATRONES DE REDONDEZ DEL TIPO DE CASQUETE ESFÉRICO, CON MEDIDORA DE REDONDEZ.

Se calibra un PRC de las siguientes características:

- De vidrio.
- Montado sobre una base metálica de acero.

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

- Campo de medida $C = 250 \mu\text{m}$.
- División de escala $E = 0,01 \mu\text{m}$.
- Dispone de los siguientes filtros: 15 opr, 50 opr, 150 opr y 500 opr.
- La incertidumbre expandida de la corrección de calibración de la MR obtenida de su última calibración es: $U_{oR} = 0,10 \mu\text{m}$ (para $k = 2$). La corrección de calibración $C_{oR} = 0$.
- De calibraciones anteriores de la MR se dispone de los siguientes datos: $D_{R_i} = 0,02 \mu\text{m}$, $D_{R_{i-1}} = 0,01 \mu\text{m}$.

Se realiza la calibración para todos los filtros disponibles, de la forma descrita en el apartado 5.1.3. En el presente ejemplo se desarrollan los cálculos y resultados para el filtro de 500 opr, siendo todo análogo para el resto de los filtros.

La temperatura durante la calibración se mantiene dentro de $20 \text{ }^\circ\text{C} \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$.

Se obtienen las lecturas y resultados que se indican en la tabla 4.



Filtro: 500 opr			
	H ₁ = 45 mm	H ₂ = 48 mm	H ₃ = 51 mm
Lecturas ΔZ_q (μm)	0,05	0,05	0,05
	0,05	0,05	0,05
	0,05	0,04	0,05
	0,05	0,05	0,05
	0,06	0,05	0,05
	0,05	0,04	0,05
	0,05	0,05	0,04
	0,06	0,04	0,05
	0,05	0,05	0,05
	0,05	0,05	0,05
	Media (μm)	0,052	0,047
S (μm)	0,004	0,005	0,003

Tabla 4: Toma de datos y cálculos realizados

La desviación de redondez del patrón es:

$$\overline{\Delta Z_{qk}} = 0,052 \mu\text{m} \approx 0,05 \mu\text{m}.$$

El redondeo realizado de 0,002 μm se sumará a la incertidumbre final.

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 5.



Magnitud X_i	Estimación X_i	Incertidumbre típica $u(x_i) \mu\text{m}$	Distribución de probabilidad	Coficiente de sensibilidad C_i	Contribución a la incertidumbre $u(y) \mu\text{m}$
$(\overline{\Delta Z_{qik}})_M$	0,052	0,002	normal	1	0,002
C_{GR}	0	0,050	normal	1	0,050
C_{tr}	0	0,006	rectangular	1	0,006
C_{ER}	0	0,003	rectangular	1	0,003
ΔZ_{qk}	0,052	Incertidumbre típica combinada ($u_{\Delta Z_{qk}}$)			0,050
		Incertidumbre expandida ($U_{\Delta Z_{qk}}$)			0,100

Tabla 5: Contribuciones a la incertidumbre combinada en la calibración de un PRC con MR

La incertidumbre expandida queda, una vez redondeada:

$$U_{\Delta Z_{qk}} = 0,100 \mu\text{m} + 0,002 \mu\text{m} \approx 0,10 \mu\text{m}$$

Dado que las contribuciones de incertidumbre que presentan una distribución normal, son las que más peso tienen, el factor de cobertura k es igual a 2; no obstante, y a efectos didácticos del



ejemplo, se calcula k a partir de los resultados de la ecuación de Welch-Satterthwaite (ref. [5]):

$$v_{ef} = \frac{0,050^4}{\left(\frac{0,005}{\sqrt{10}}\right)^4} = 10\ 698\ 506$$
$$10 - 1$$

Entrando en la tabla de la (ref. [5]), se obtiene el valor de k . En este caso $k = 2$.

En resumen, la desviación de redondez del patrón para el filtro de 500 opr, a una altura de la base de apoyo de entre 45 mm y 51 mm es:

$$\overline{\Delta Z}_{qk} = 0,05\ \mu\text{m} \pm 0,10\ \mu\text{m}$$

Para los demás filtros, se realizaría la calibración de forma análoga a lo descrito en este punto, siendo los cálculos a realizar los mismos.

ANEXO 2: CALIBRACIÓN DE PATRONES DE REDONDEZ DE BISEL CON MEDIDORA DE UNA COORDENADA HORIZONTAL.

Se calibra un PRB de las siguientes características:

- De acero.
- Montado sobre una base metálica de acero.

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

- Campo de medida $C = 1\ 000\ \text{mm}$.



- División de escala $E = 0,1 \mu\text{m}$.
- La incertidumbre expandida de la corrección de calibración de la M1C obtenida de su última calibración es: $U_{oM} = 0,3 \mu\text{m}$ (para $k = 2$). La corrección de calibración $C_{oM} = 0$.
- De calibraciones anteriores de la M1C se dispone de los siguientes datos: $D_{M_i} = 0,3 \mu\text{m}$, $D_{M_{i-1}} = 0,2 \mu\text{m}$.

La temperatura durante la calibración se mantiene dentro de $20 \text{ }^\circ\text{C} \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$.

Se realiza la calibración, de la forma descrita en el apartado 5.2.3, obteniéndose las lecturas y resultados que se indican en la tabla 6.

	a_i (mm)	b_i (mm)
Lecturas	19,021 9	19,008 4
	19,022 0	19,008 7
	19,021 9	19,008 5
	19,021 9	19,008 4
	19,021 9	19,008 6
	19,022 0	19,008 4
	19,021 9	19,008 7
	19,021 9	19,008 5
	19,021 9	19,008 5
	19,021 9	19,008 5
Media (mm)	19,021 92	19,008 52
s (μm)	0,042	0,114

Tabla 6: Toma de datos y cálculos realizados

La desviación de redondez del patrón es:



$$\Delta Z_{qB} = \bar{a} - \bar{b} = 19,021\ 92 - 19,008\ 52 = 13,40\ \mu\text{m}$$

La incertidumbre expandida se calcula según lo indicado en el apartado 6.2.1.

Realizando los cálculos indicados en la tabla 2 del apartado 6.2.1, se obtienen los resultados de la tabla 7.

Magnitud X_i	Estimación x_i (mm)	Incertidumbre típica $u(x_i)$ μm	Distribución de probabilidad	Coefficiente de sensibilidad c_i	Contribución a la incertidumbre $u_i(y)$ μm
a	19,021 92	0,01	normal	1	0,01
b	19,008 52	0,04	normal	1	0,04
C_{EM_a}	0	0,04	triangular	1	0,04
C_{EM_b}	0	0,04	triangular	1	0,04
ΔZ_{qB}	13,4 μm	Incertidumbre típica combinada ($u_{\Delta Z_{qB}}$)			0,07
		Incertidumbre expandida ($U_{\Delta Z_{qB}}$)			0,14

Tabla 7: Contribuciones a la incertidumbre combinada en la calibración de un PRB con M1C



La incertidumbre expandida queda una vez redondeada:

$$U_{\Delta Z_{qB}} = \pm 0,2 \mu\text{m}$$

Dado que las contribuciones de incertidumbre que presentan una distribución normal, son las que más peso tienen, el factor de cobertura k , es igual a 2; no obstante, y a efectos didácticos del ejemplo, se calcula k a partir de los resultados de la ecuación de Welch-Satterthwaite (ref. [5]):

$$v_{ef} = \frac{0,07^4}{\frac{\left(\frac{0,042}{\sqrt{10}}\right)^4}{10-1} + \frac{\left(\frac{0,114}{\sqrt{10}}\right)^4}{10-1}} = 123$$

Entrando en la tabla de la (ref. [5]), se obtiene el valor de k . En este caso $k = 2$.

En resumen la desviación de redondez del patrón es:

$$\Delta Z_{qB} = 13,4 \mu\text{m} \pm 0,2 \mu\text{m}$$



ANEXO 3: CALIBRACIÓN DE PATRONES DE REDONDEZ DE CILINDRO INCLINADO CON MEDIDORA DE UNA COORDENADA HORIZONTAL Y PROYECTOR DE PERFILES O MEDIDORA DE TRES COORDENADAS CON PLATO DIVISOR DE TRAZOS.

Se calibra un PRI de las siguientes características:

- De acero.
- Montado sobre una base metálica de acero.

La calibración se realiza con los siguientes instrumentos:

Medidora de una coordenada horizontal de las siguientes características:

- Campo de medida $C = 1\ 000\ \text{mm}$.
- División de escala $E = 0,1\ \mu\text{m}$.
- La incertidumbre expandida de la corrección de calibración de la M1C obtenida de su última calibración es: $U_{oM} = 0,3\ \mu\text{m}$ (para $k = 2$). La corrección de calibración $C_{oM} = 0$.
- De calibraciones anteriores de la M1C se dispone de los siguientes datos: $D_{M_i} = 0,3\ \mu\text{m}$, $D_{M_{i-1}} = 0,2\ \mu\text{m}$.

Proyector de perfiles de las siguientes características:

- Campo de medida $C = 360^\circ$.
- División de escala $E = 1'$.
- La incertidumbre expandida de la corrección de calibración del PP obtenida de su última calibración es: $U_{oP} = 3'$ (para $k = 2$). La corrección de calibración $C_{oP} = 0$.
- De calibraciones anteriores del PP se dispone de los siguientes datos: $D_{P_i} = 3'$, $D_{P_{i-1}} = 2'$.



Se realiza la calibración, de la forma descrita en el apartado 5.3.3, obteniéndose las lecturas y resultados que se indican en la tabla 8.

La temperatura durante la calibración se mantiene dentro de $20\text{ °C} \pm 1\text{ °C}$.

	d_i (mm)	α_i
Lecturas	24,965 8	2° 16'
	24,966 0	2° 16'
	24,965 8	2° 16'
	24,965 9	2° 16'
	24,966 0	2° 14'
	24,965 8	2° 16'
	24,965 9	2° 15'
	24,965 8	2° 16'
	24,965 8	2° 16'
	24,965 8	2° 16'
Media	24,965 86 mm	2° 15,7'
S	0,084 μm	0,67'

Tabla 8: Toma de datos y cálculos realizados

$$\bar{\alpha} = 2^\circ 15,7' = 0,039 \text{ rad}$$

$$s_{\alpha} = 0,67' = 1,9 \cdot 10^{-4} \text{ rad}$$

La desviación de redondez del patrón es:

$$\Delta Z_{qt} = \frac{d_c}{2} \cdot \left(\frac{1}{\cos \alpha_c} - 1 \right) = \frac{24\,965,86}{2} \cdot \left(\frac{1}{\cos 0,039} - 1 \right) = 9,7 \mu\text{m}$$

La incertidumbre expandida se calcula según lo indicado en el apartado 6.3.1.

Realizando los cálculos indicados en la tabla 3 del apartado 6.3.1, se obtienen los resultados de la tabla 9.



Magnitud 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	24,965 860 mm	0,027 μm	normal	1	0,027 μm
C_{oM}	0	0,150 μm	normal	1	0,150 μm
C_{dM}	0	0,058 μm	rectangular	1	0,058 μm
C_{EM}	0	0,041 μm	triangular	1	0,041 μm
d_c	24,965 860 mm	Incertidumbre típica combinada (u_{d_c})			1,012 μm
α	α	$6.21 \cdot 10^{-5}$ rad	normal	1	$6.21 \cdot 10^{-5}$ rad
C_{oP}	0	0,000 4 rad	normal	1	0,000 4 rad
C_{dP}	0	0,000 2 rad	rectangular	1	0,000 2 rad
C_{EP}	0	0,000 1 rad	triangular	1	0,000 1 rad
α_c	2° 15,7'	Incertidumbre típica combinada (u_{α_c})			0,000 5 rad
d_c	24,965 860 mm	1,012 μm	normal	0,000 4 μm	0,000 4 μm
α_c	2° 15,7'	0,000 5 rad	normal	493,386 μm	0,240 0 μm
ΔZ_{qt}		Incertidumbre típica combinada ($u_{\Delta Z_{qt}}$)			0,240 0 μm
		Incertidumbre expandida ($U_{\Delta Z_{qt}}$)			0,479 9 μm

Tabla 9: Contribuciones a la incertidumbre combinada en la calibración de un PRI con M1C y PP o PD



La incertidumbre expandida queda, una vez redondeada:

$$U_{\Delta Z_{qt}} = \pm 0,5 \mu\text{m}$$

Dado que las contribuciones de incertidumbre que presentan una distribución normal son las que más peso tienen, el factor de cobertura k , es igual a 2; no obstante, y a efectos didácticos del ejemplo, se calcula k a partir de los resultados de la ecuación de Welch-Satterthwaite (ref. [5]):

$$v_{ef} = \frac{0,4799^4}{\frac{\left[\left(\frac{1}{2 \cdot \cos 0,039} - \frac{1}{2} \right) \cdot \frac{0,084}{\sqrt{10}} \right]^4}{10-1} + \frac{\left[\left(\frac{24\,965,86 \cdot \sin 0,039}{2 \cdot \cos^2 0,039} \right) \cdot \frac{1,9 \cdot 10^{-4}}{\sqrt{10}} \right]^4}{10-1}} = 33\,892$$

Entrando en la tabla de la (ref. [5]), se obtiene el valor de k . En este caso $k = 2$.

En resumen la desviación de redondez del patrón es:

$$\Delta Z_{qt} = 9,7 \mu\text{m} \pm 0,5 \mu\text{m}$$

