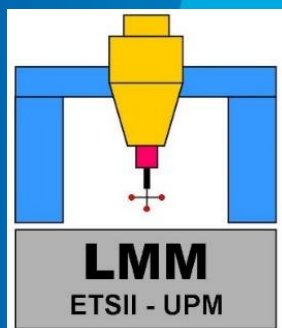


Trazabilidad en Microscopía Tridimensional en Entornos Industriales

Alberto Mínguez Martínez, Jesús de Vicente y Oliva



INDUSTRIALES
ETSII | UPM



- ⊕ **Objetivo**
- ⊕ **Introducción**
- ⊕ **Procedimiento de calibración**
- ⊕ **Resultados**
- ⊕ **Conclusiones**

El objetivo de este trabajo es:

Dotar de trazabilidad a las medidas punto a punto realizadas con un microscopio 2,5D en entornos industriales, utilizando patrones de medida fáciles de obtener y calibrar con bajas incertidumbres en laboratorios acreditados

Miniaturización

La tendencia actual de la industria es a obtener componentes con dimensiones cada vez menores. Es lo que se conoce como **miniaturización**.

- ⊕ El concepto nació entre finales de la década de 1960 y principios de la década de 1970.
- ⊕ Desarrollo de nuevas técnicas de fabricación (como la **fabricación aditiva**).
- ⊕ Adaptación de los procesos de fabricación tradicionales.
- ⊕ Adaptación del **control dimensional**.



Fuente: www.opticstechnology.com

Escalas de medida:

- **Macro** ($x \geq 1 \text{ mm}$)
- **Mini** ($1 \mu\text{m} \leq x \leq 1 \text{ mm}$)
- **Micro** ($1 \mu\text{m} \geq x$)

El problema de la trazabilidad (1)

En Medición por Coordenadas (MC), se dispone de las siguientes normas que tratan de resolver el problema de la trazabilidad:

⊕ Serie ISO 10360 → Solo sirve para verificaciones de las MMCs

La Nota Técnica 15 ENAC indica que la verificación no es suficiente para dotar de trazabilidad a las medidas realizadas con MMCs, ya que habría que estimar las 21 componentes de error:

⊕ Serie ISO 15530 → Busca estimar incertidumbres de uso a nivel macro (medidas mayores a 1 mm).

⊕ Serie ISO 25178 → Centrada en rugosidad y textura superficial pero no en medidas dimensionales a nivel micro (del orden de 1 μm).

El problema de la trazabilidad (1)

En Medición por Coordenadas (MC), se dispone de la siguientes normas que tratan de resolver el problema de la trazabilidad:

⊕ Serie ISO 10360 → Solo sirve para verificaciones de las MMCs

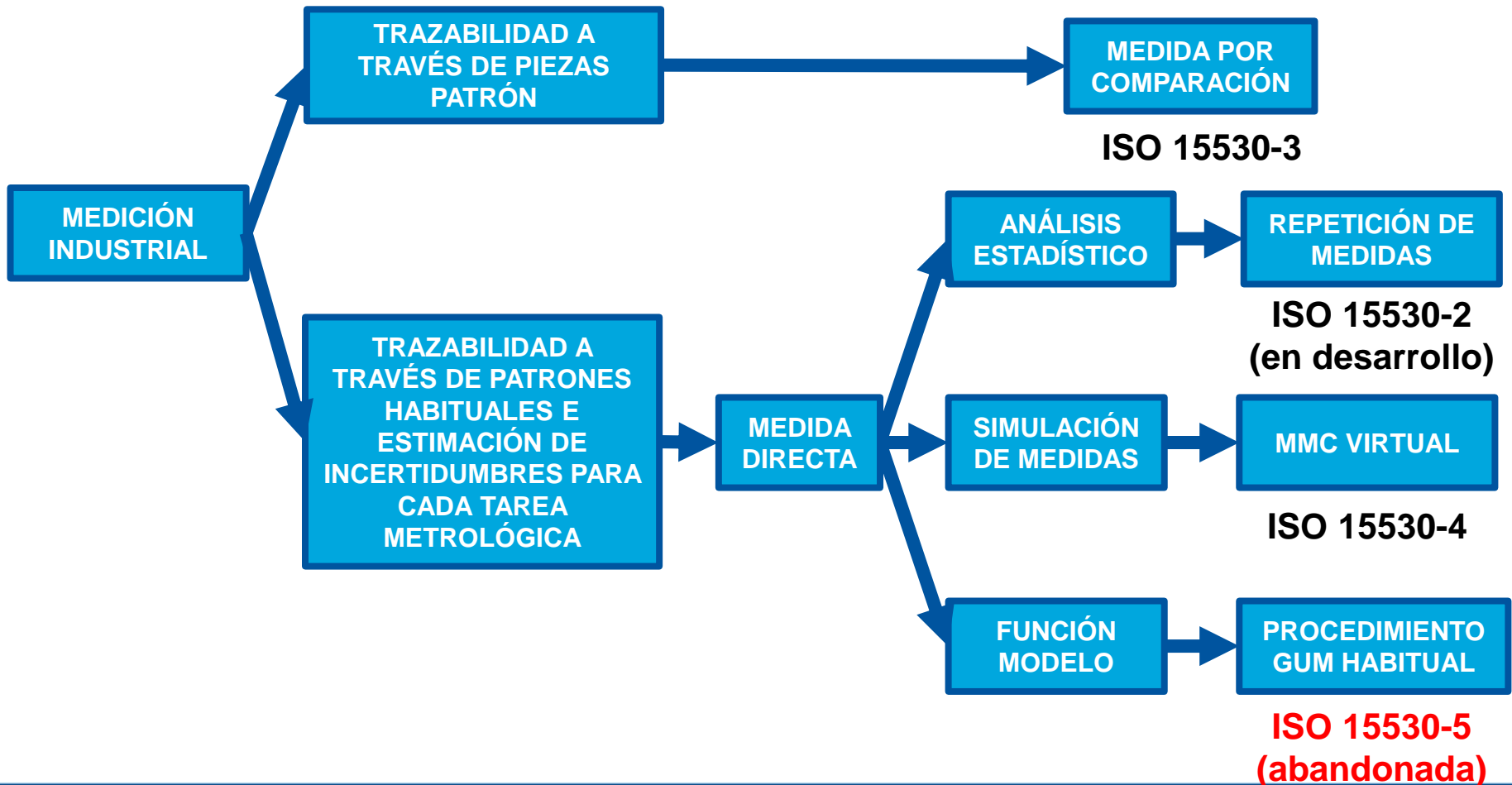
La Nota Técnica 15 ENAC indica que la verificación no es suficiente para dotar de trazabilidad a las medidas realizadas con MMCs, ya que habría que estimar las 21 componentes de error:

⊕ Serie ISO 15530 →

⊕ Serie ISO 25178 →

**El nivel "MINI" no
está cubierto**

El problema de la trazabilidad (2)



El problema de la trazabilidad (3)

Para trabajar a escalas micro- y nano, existen varios problemas **a nivel industrial**:

- ⊕ No existe una respuesta completa. → Hay que buscar una lo más general posible.
- ⊕ Solo se realiza a nivel **macro** (serie ISO 15530). → Buscar solución a nivel **mini** y **micro** (serie ISO 25178).
- ⊕ Existen patrones completos e interesantes pero caros y difíciles de obtener y calibrar. → Buscar patrones sencillos y fáciles de calibrar con baja incertidumbre en laboratorios acreditados.

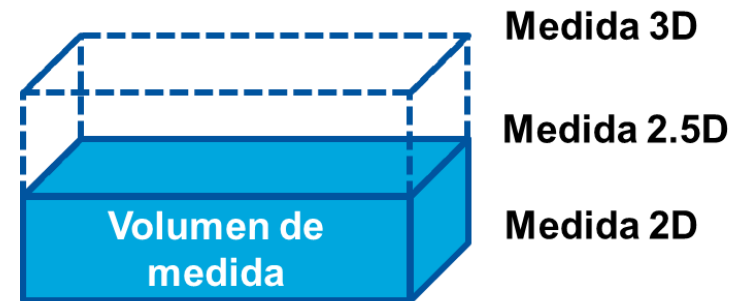
Se han propuesto soluciones como las **micro – MMC** (riesgo de daño a la superficie de las piezas) y el uso de **sistemas ópticos 2,5D y 3D**.

Sistemas ópticos 2,5 D y 3D (3)

Son sistemas ópticos capaces de registrar datos en el eje Z. Gracias a esto, se pueden obtener datos cuantitativos y cualitativos de la geometría 3D de las superficies.

Entre otros, destacan los siguientes **tipos**:

- ⊞ Sistemas de visión.
- ⊞ Microscopios de enfoque automático.
- ⊞ Microscopios de variación de foco.
- ⊞ Microscopios confocales.



Se va a utilizar un **microscopio confocal** LEICASCAN DCM 3D.

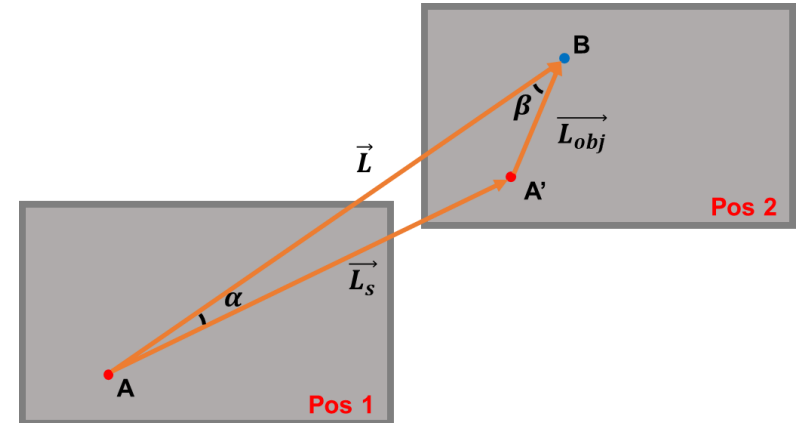
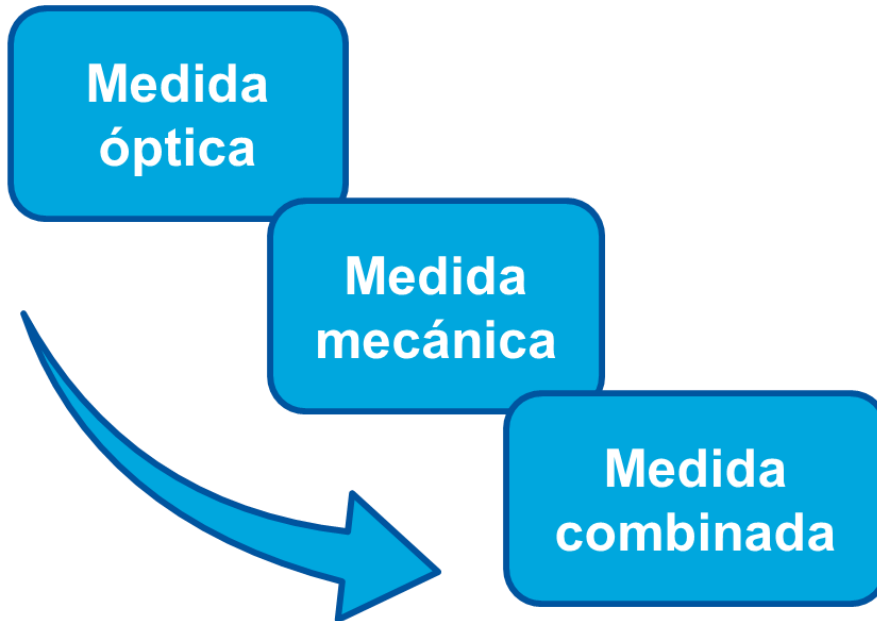
Modelo utilizado

Para la calibración de instrumentos de medida 2,5D se propone buscar una **función modelo** que corrija las lecturas brutas obtenidas con el instrumento de medida. La función modelo que se propone es lineal y tiene la siguiente forma:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & C & 0 \\ C & B & 0 \\ 0 & 0 & D \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} p \\ q \\ r \end{bmatrix}$$

- ⊕ A, B y D: factores de calibración lineal de los ejes X, Y y Z.
- ⊕ C: posible defecto de perpendicularidad entre los ejes X e Y.
- ⊕ Los **términos nulos** son los defectos de perpendicularidad entre los ejes Z y X y entre los ejes Z e Y. Son **despreciables** puesto que el **rango de medida en Z es corto** (instrumento de medida 2'5D).

Fases de la calibración



$$\overrightarrow{AB} = \overrightarrow{AA'} + \overrightarrow{A'B}$$

$$\vec{L} = \vec{L}_s + \vec{L}_{obj}$$

$$L = L_s \cdot \cos(\alpha) + L_{obj} \cdot \cos(\beta)$$

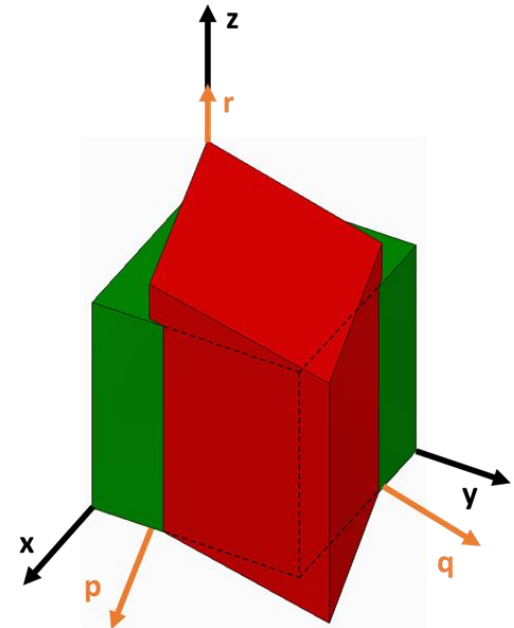
$$U(L) \leq k \cdot \sqrt{u^2(L_s) + u^2(L_{obj})}$$

Modelo matricial para la medida (1)

$$\vec{X} = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \bar{M} \cdot \vec{p} = \begin{bmatrix} 1 + c_{xy} + a & \theta/2 & 0 \\ \theta/2 & 1 + c_{xy} - a & 0 \\ 0 & 0 & 1 + c_z \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} p \\ q \\ r \end{bmatrix}$$

Donde:

- ⊕ c_{xy} es la desviación relativa de la anchura del píxel respecto al nominal.
- ⊕ a es la diferencia relativa entre las anchuras de los píxeles en X e Y.
- ⊕ θ es el error de perpendicularidad entre los ejes X e Y.
- ⊕ c_z es la corrección de las medidas en el eje Z.



Modelo matricial para la medida (2)

Para el cálculo de los parámetros y sus incertidumbres asociadas:

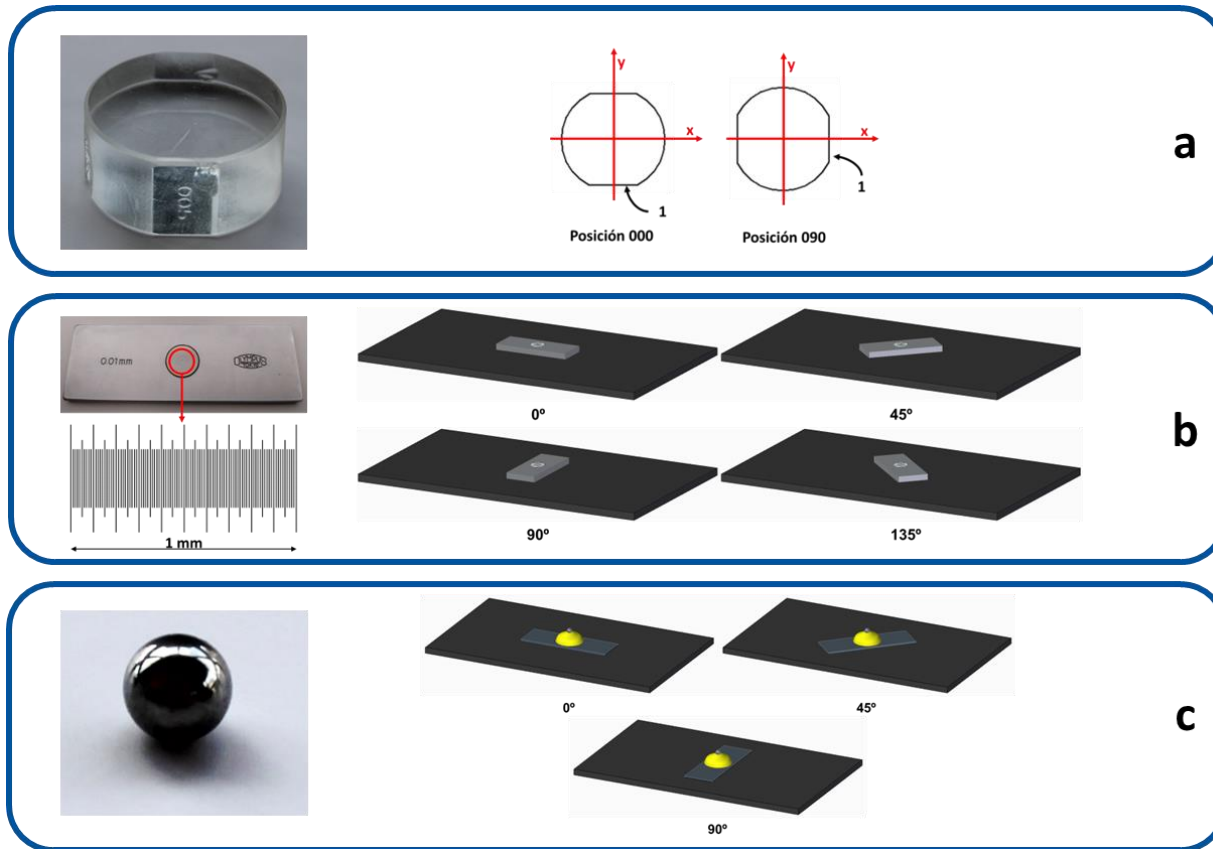
$$\# \quad c_{xy} = \frac{l_0}{4} \cdot \left(\sum_i \frac{1}{l_i} \right) \quad u(c_{xy}) = \frac{\sqrt{u^2(\ell_0) + \sum_i \frac{u^2(\ell_i)}{16}}}{\ell_0}$$

$$\# \quad a = \frac{l_0}{2} \cdot \left(\frac{1}{l_1} - \frac{1}{l_2} \right) \quad u(a) = \frac{\sqrt{u^2(\ell_1) + u^2(\ell_2)}}{2\ell_0}$$

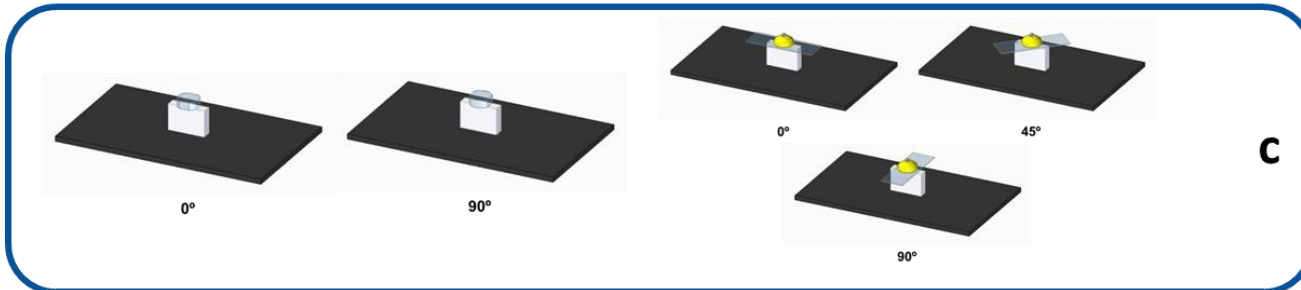
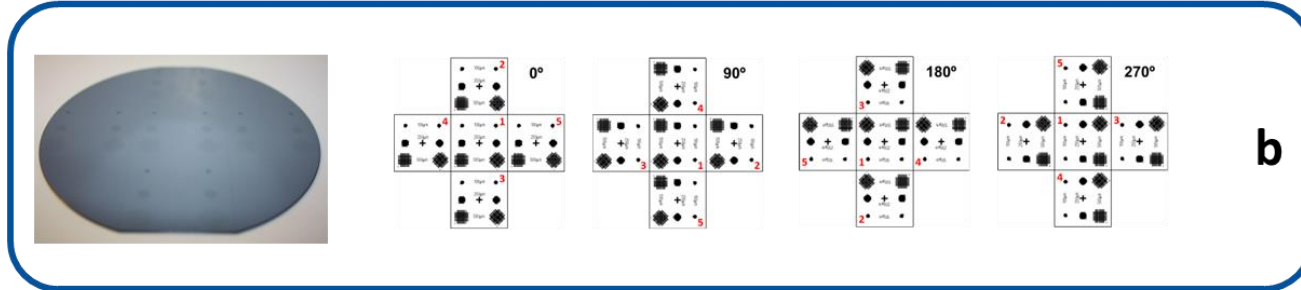
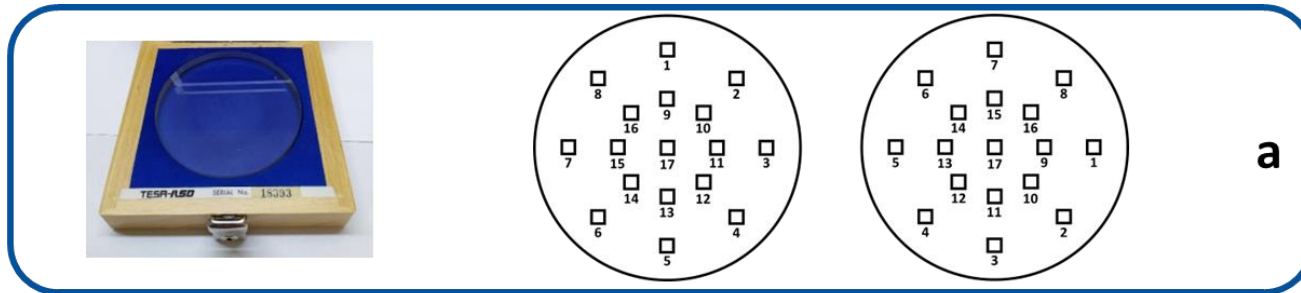
$$\# \quad \theta = \ell_0 \cdot \left(\frac{1}{\ell_3} - \frac{1}{\ell_4} \right) \quad u(\theta) = \frac{\sqrt{u^2(\ell_3) + u^2(\ell_4)}}{\ell_0}$$

$$\# \quad c_z = \frac{D_m}{D_0} \cdot (1 + 2c_{xy}) - 1 \quad u(c_z) = \sqrt{\frac{u^2(D_0) + u^2(D_m)}{D_0^2} + 4u^2(c_{xy})}$$

Patrones utilizados (medida óptica)

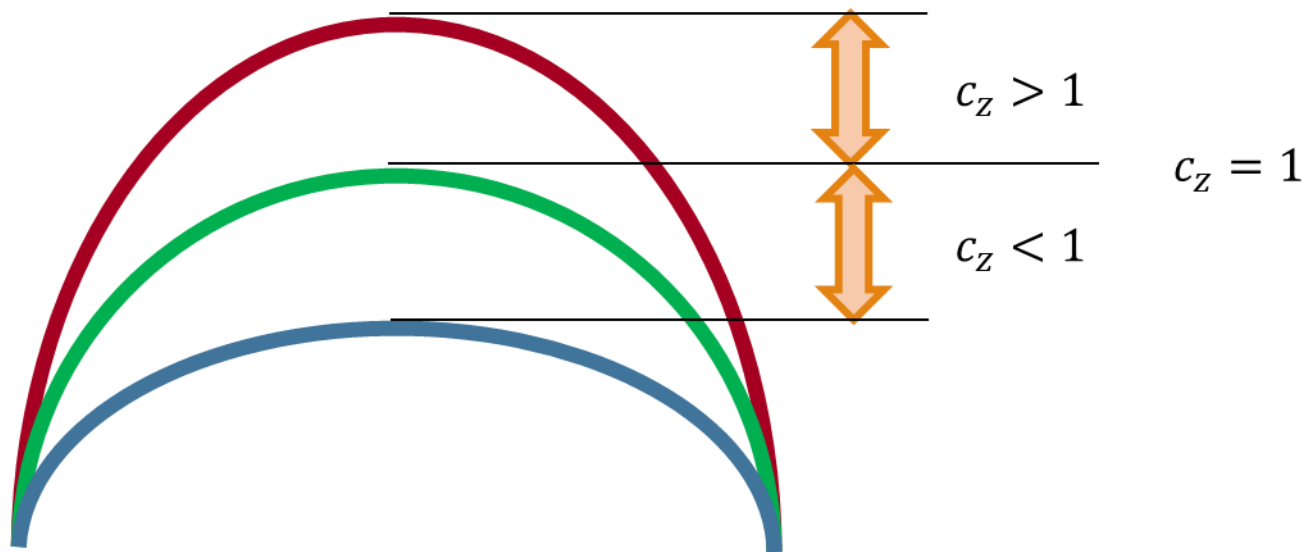


Patrones utilizados (medida mecánica)



Trazabilidad en eje Z

MEDIDA DEL CASQUETE ESFÉRICO



Resultados de la calibración

Parámetro	Valor	Un.	Incert.	Parámetro	Valor	Un.	Incert.
$c_{xy,obj}$	0.00883	-	0.00050	$c_{xy,wt}$	0.000243	-	0.000036
a_{obj}	-0.000040	-	0.000036	a_{wt}	-0.000283	-	0.000031
θ_{obj}	-0.000798	-	0.000074	θ_{wt}	-0.000071	-	0.000023
$c_{z,obj}$	0.0101	-	0.0014	$c_{z,col}$	0.0339	-	0.0038
$r(c_{xy,obj}, c_{z,obj})$	0.72	-	-	$r(c_{xy,wt}, c_{z,col})$	0.86	-	-
$s_r(x) = s_r(y)$	0.4	μm	-	$u_{FLT,T}$	0.74	μm	-
$s_r(z)$	1.1	μm	-	$u_{NL,xy,wt}$	2.6	μm	-
$w_{xy,obj}$	1.65	μm	-	$w_{xy,wt} = w_{z,col}$	0.1	μm	-

Medidas de longitud en el plano XY

Se obtiene que para distancias punto a punto y con $k = 2$, lo que asegura una cobertura del 95%, la incertidumbre expandida se calcula como:

$$U(L_i) = k \cdot \sqrt{L_{xy,i}^2 \cdot \left\{ u^2(c_{xy,i}) + \frac{a_i^2}{3} + u^2(a_i) + \frac{1}{2} \left[\frac{\theta_i^2}{3} + u^2(\theta_i) \right] \right\} + u_{NL,xy,i}^2 + s_r^2(x) + \frac{w_{xy}^2}{12}}$$

Se obtienen los siguientes resultados:

$$U(L_{xy,obj}) \leq 1,9 \mu\text{m} + \frac{L_{xy,obj}}{1600}$$

$$U(L_{xy,wt}) \leq 7,8 \mu\text{m} + \frac{L_{xy,s}}{3500}$$

$$U(L_{xy}) \leq 9,7 \mu\text{m} + \frac{L_{xy}}{1100}$$

Medidas de longitud en el eje Z

Se obtiene que para distancias punto a punto y con $k = 2$, lo que asegura una cobertura del 95%, la incertidumbre expandida se calcula como:

$$U(h) = k \cdot \sqrt{h^2 \cdot u^2(c_z) + u_{\text{FLT}}^2 + s_r^2(z) + \frac{w_z^2}{12}}$$

Se obtienen los siguientes resultados:

$$U(h_{\text{opt}}) \leq 2,2 \mu\text{m} + \frac{h_{\text{obj}}}{120}$$

$$U(h) = U(h_{\text{col}}) \leq 2,6 \mu\text{m} + \frac{h}{133}$$

Comparativa entre las medidas óptica y mecánica

En el caso de este microscopio confocal:

- ⊕ La incertidumbre de la medida mecánica de este microscopio es casi **5 veces mayor** que la de la medida óptica. Esto se produce porque **la calidad metrológica de la mesa de medida es inferior a la de los objetivos** (situación que puede ser bastante habitual).
- ⊕ En el caso del eje Z, no hay diferencia significativa entre ambas medidas.

Se ha presentado un **método de calibración completo** que dota de una trazabilidad adecuada a las escalas para las medidas de longitud obtenidas con un microscopio confocal.

- ⊕ El **procedimiento de calibración** es razonablemente **simple**.
- ⊕ Se seleccionan **patrones de referencia** que sean **fáciles de encontrar y de calibrar**.
- ⊕ El procedimiento permite estimar los coeficientes de amplificación, defectos de linealidad y planitud, errores de perpendicularidad, repetibilidades y la diferencia relativa entre las dimensiones del pixel en los ejes X e Y.
- ⊕ Se consigue una **fórmula** que da una solución al problema de estimar las incertidumbres **para un número finito de tareas metrológicas**.
- ⊕ Con cambios menores, este procedimiento puede ser usado para dotar de trazabilidad a las escalas de otros instrumentos de medida óptica 2,5D.

En cuanto al **modelo global de calibración**:

- ⊕ Permite realizar medidas trazables aprovechando el volumen de medida del instrumento.
- ⊕ Pone de manifiesto las grandes incertidumbres que puede llegar a introducir el movimiento de la mesa. Las incertidumbres introducidas por el movimiento de la mesa dependen directamente de la calidad de esta. Una buena mesa XY debería ser capaz de dar incertidumbres menores de $1 \mu\text{m}$.

La **metodología** propuesta podría usarse para:

- ⊕ Dotar de trazabilidad a otros instrumentos de medida similares, es decir, que trabajen con imágenes representadas por vóxeles (variación de foco y máquinas de visión).
- ⊕ Dotar de trazabilidad a las medidas realizadas con instrumentos ópticos 3D en entornos industriales.
- ⊕ Ofrecer servicios de calibración a la industria.
- ⊕ Acreditar medidas dimensionales con instrumentación óptica 3D en laboratorios de calibración.



INDUSTRIALES
ETSII | UPM



**GRACIAS POR
VUESTRA ATENCIÓN**



INDUSTRIALES
ETSII | UPM