

Uso del microscopio confocal para la caracterización dimensional en micromecanizados (step height)

Guarneros García Orlando¹, de Vicente y Oliva Jesús², Ocaña Moreno José Luis³, Maya Méndez Mauro Eduardo¹, Rodríguez Reyna Sandra Luz¹ y Espericueta González Dora Erika¹

¹Universidad Autónoma de San Luis Potosí. Facultad de Ingeniería. C.P.: 78290, San Luis Potosí, México.

²Laboratorio de Metrología y Metrotecnia, Departamento de Física Aplicada
Universidad Politécnica de Madrid. C.P. 28006 Madrid, España.

³Centro Láser, Departamento de Física Aplicada
Universidad Politécnica de Madrid. C.P. 28031. Madrid, España.

Resumen

La elaboración de dispositivos cuyas dimensiones son del orden de los micrómetros requiere sistemas de medición que verifiquen no sólo sus características cualitativas sino también cuantitativas. Aún cuando existen una gran gama de equipos que pueden ser utilizados para este fin, la microscopía confocal se da a conocer como una técnica viable en el campo de la ingeniería, inclusive algunos fabricantes están especializando sus equipos en las áreas de ingeniería de materiales y en aspectos meramente dimensionales. Sin embargo, es necesario estimar su incertidumbre y asociarle el grado de dispersión que le corresponde. En el presente trabajo se muestra cómo obtener la diferencia de alturas en superficies topográficas generadas en 3D, para ello se utiliza un patrón de alturas y se realiza toda una serie de pruebas que consideran entre otras cosas; el objetivo utilizado y sus diferentes ampliaciones, el campo de medida y la posición del mensurando. Finalmente se analiza toda la información mediante el uso de gráficas que muestran las incertidumbres estimadas a lo largo de todo el proceso.

Abstract

The development of devices whose dimensions are of the order of magnitude of micrometers requires measurement systems to verify not only their quantitative but also qualitative characteristics. Even though there is a wide range of equipments that can be used towards this end, confocal microscopy reveals itself as a feasible technique in the engineering field, even some manufacturers are specializing their equipment in the areas of materials science and metrology. However, it is necessary to estimate their uncertainty and determine its degree of dispersion. In the present work it shown how to obtain the height differences from 3D generated topographical surfaces, to do it a height standard is used and a series of tests is performed that consider, among other things, the lens used and different magnifications, the field of measurement and the position of the object to be measured. Finally the information is analyzed by using graphs showing the estimated uncertainties throughout the entire process.

Palabras clave:

Metrología, calibración, microscopía confocal, incertidumbre y diferencia de alturas.

Keywords:

Metrology, calibration, confocal microscope, uncertainties and step height.

Introducción

La Microscopía Confocal es considerada una técnica novedosa que muestra claras ventajas sobre la microscopía óptica convencional. La idea tan sencilla de ir restringiendo la iluminación del espécimen a sólo un punto (ó una serie de puntos) y escanearlo para producir una imagen completa, así como insertar una apertura en el sistema óptico, origina que físicamente se previene la luz emanada de las regiones por arriba y por debajo del plano focal contribuyendo a la obtención de una mejor imagen (ver figura 1). Estas características de la microscopía confocal así como una poderosa resolución axial, permite al sistema óptico (sin invadir al espécimen) un seccionamiento y una adquisición de imágenes en 3D. La microscopía confocal inclusive tiene una pequeña pero significativa mejora en su resolución lateral. El Microscopio Confocal por lo tanto permite generar imágenes tridimensionales de los objetos observados, Soto (1993).

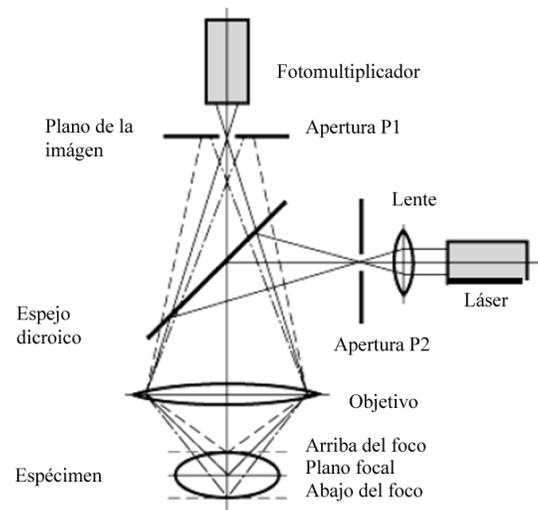


Figura 1 Esquema de funcionamiento de un Microscopio Confocal láser. Tomado de Baccallao y Stelzer, 1989.

La información obtenida al explorar un mensurando (por ejemplo; las deformaciones en el travesaño inferior, sometido a un tratamiento con láser, ver figura 2) permite la creación de un mapa topográfico (en mm) de la superficie de éste, mediante un método de medida sin contacto y por lo tanto desprovisto del riesgo de dañar a una pieza de magnitudes tan pequeñas.

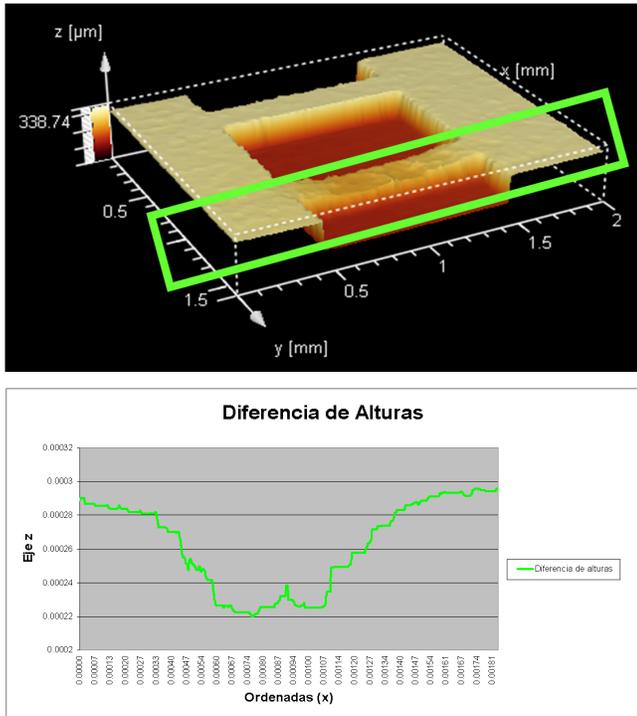


Figura 2. Seccionamiento del travesaño doblado (limitado con un rectángulo), así como la gráfica que muestra su variación de alturas.

Para altas velocidades, el haz se moverá mediante el uso de dos galvanómetros que conducirán los espejos que serán utilizados como escáner para el haz láser en “x”, “y” y “z”, manteniendo la calidad del haz y la formación de voxeles que irán conformando la imagen topográfica, cada una de ellas realizándose mediante la configuración de una serie de seccionamientos a lo largo del eje z, que acopladas crearán el objeto a caracterizar (ver figura 3). Mientras no sea lo suficientemente rápido como para alcanzar el tiempo real en las imágenes completas, el microscopio Confocal basado en el uso de galvanómetros, tiene la capacidad de manejar varias imágenes por segundo, Yao and Wang (2005).

Todo ello permite que su campo de utilización incluya un amplio espectro de aplicaciones como puedan ser la medición y/o verificación de microsistemas, cabezales de video, semiconductores, etc. Más sin embargo el operador confía en las correcciones de la calibración del equipo, así como también en las correcciones de sus subsiguientes mediciones. Pero la experiencia ha demostrado que el equipamiento frecuentemente, no ha sido satisfactoriamente calibrado. Especialmente la trazabilidad de las mediciones, un tema que en la actualidad y de manera muy general, no se encuentran suficientemente garantizados,

Breil, Fries, Garnaes, Haycocks, Hüser, Joergensen, Kautek, Koenders, Kofod, Koops, Korntner, Lindner, Mirandé, Neubauer, Peltonen, Picotto, Pisani, Rothe, Sahre, Stedman and Wilkening, (2002). Las pruebas técnicas realizadas en la mayoría de microscopios de barrido y sondeo muestran la presencia de problemas en 3D que generalmente se presentan en forma de infravaloración de la incertidumbre de la medida, Dai, Pohlenz, Xu, Koenders, Danzebrik and Wilkening (2006).

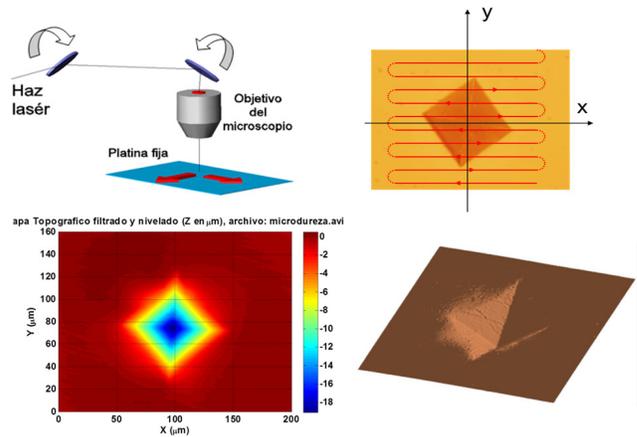


Figura 3. Método por medio del cual dos galvanómetros conducirán los espejos que serán utilizados como escáner que conformará el objeto de estudio en 3D.

Diagrama de Stedman

La figura No.4 elaborada por Stedman representa las diferentes técnicas utilizadas para la observación y la medición en la micro y la nano metrología, comparando las dimensiones laterales con las dimensiones verticales. En ella se destaca al microscopio confocal que estaría considerado dentro de los SPM (Scanning Probe microscope), Chiffre, Kunzmann, Peggs, Lucca (2003).

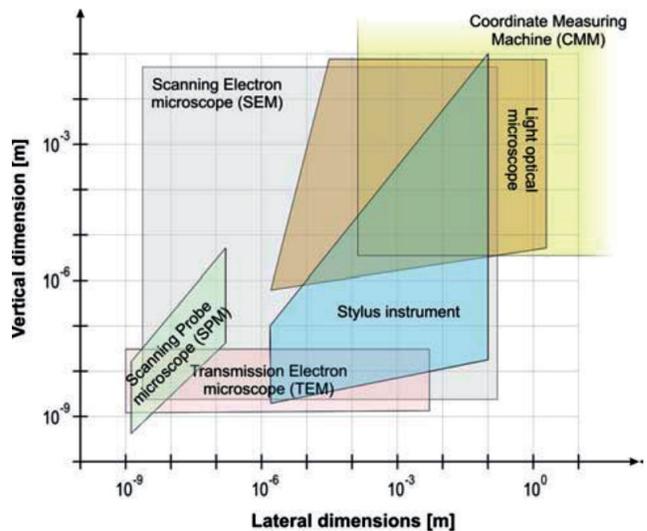


Figura 4. Instrumentos de medición para la nano y la micrometrología.

Objetivos

Evaluar la microscopía confocal desde la perspectiva de sus aplicaciones en metrología dimensional concretamente en la diferencia de alturas (step height), con el objetivo de permitir la medida de piezas y la calibración con patrones.

Materiales y métodos

El patrón utilizado en la experimentación se describe a continuación (ver tabla 1 y figura 6):

Código del equipo	Denominación
CL-EQ-PST-01	Patrón de Superficie Topográfica modelo: STS2 - 440P, con valores nominales de 1,8 μm 3 μm y 5 μm. De los cuales la diferencia de alturas de 1,8 μm (step height) se utilizará para la estimación de la incertidumbre a lo largo del presente estudio.

Tabla 1 Patrón de Calibración.

Una primera parte consiste en evaluar el Campo de medida (mostrada en la tabla 2), para 4 posiciones (P₁, P₂, P₃ y P₄), que respetarán la asignación numérica mostrada en la figura 5. El valor del patrón utilizado para una diferencia de alturas será de 1,8 μm. La tabla 2 refleja la serie de condiciones para llevar a cabo la experimentación, y la tabla 3 hace una descripción de los objetivos; con su apertura numérica así como el intervalo mínimo de medición en las imágenes procesadas.

Campo de medida (μm)	Objetivo						Eje z			
	5x	10x	20x	50x	50x	100x	Patrón (μm)	No. Pos.		
	Apertura numérica									
	0.12	0.25	0.4	0.5	0.75	0.9				
Zoom										
1	2000	1600	1				1.8	10		
2	1000	800	2	1			1.8	10		
3	666.7	533.3	3				1.8	10		
4	500	400	4	2	1		1.8	10		
5	400	320	5				1.8	10		
6	333.3	266.7	6	3			1.8	10		
7	250	200	8	4	2		1.8	10		
8	200	160		5		1	1	1.8	10	
9	166.7	133.3		6	3			1.8	10	
10	125	100		8	4			1.8	10	
11	100	80			5	2	2	1	1.8	10
12	83.3	66.6			6				1.8	10
13	63.3	50			8				1.8	10
14	66.7	53.3				3	3		1.8	10
15	50	40				4	4	2	1.8	10
16	40	32				5	5		1.8	10
17	33.3	26.7				6	6	3	1.8	10
18	25	20				8	8	4	1.8	10
19	20	16						5	1.8	10
20	16.7	13.3						6	1.8	10
21	12.5	10						8	1.8	10

Tabla 2 Características de los ensayos para realizar la calibración.

Condiciones del objetivo	Objetivo					
	5x	10x	20x	50x	50x	100x
	Apertura numérica					
	0.12	0.25	0.4	0.5	0.75	0.9
Zoom	Exactitud					
1	3.13	1.56	0.78	0.31	0.31	0.16
2	1.56	0.78	0.39	0.16	0.16	0.08
3	1.04	0.52	0.26	0.10	0.10	0.05
4	0.78	0.39	0.20	0.08	0.08	0.04
5	0.63	0.31	0.16	0.06	0.06	0.031
6	0.52	0.26	0.13	0.05	0.05	0.026
8	0.39	0.20	0.10	0.04	0.04	0.020

Tabla 3 Características de los objetivos utilizados.

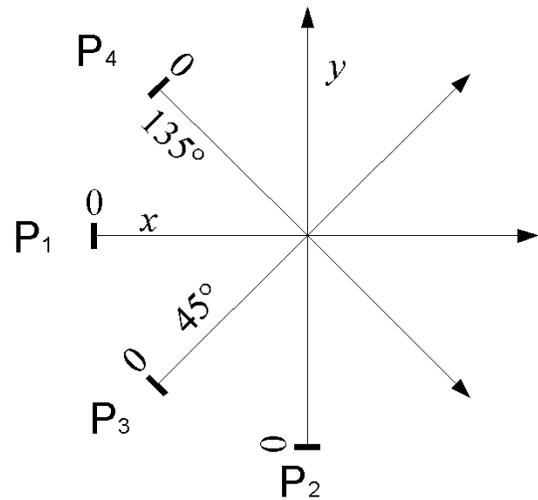


Fig.ura 5. Disposición de las mediciones en el patrón.

Calibración de la altura escalonada (step height)

Se utilizará una Patrón de Altura Escalonado modelo: SHS-1.8 QC, cuya figura 6 muestra sus partes más importantes.

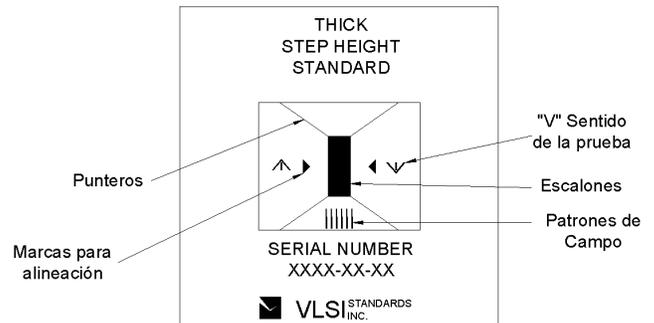


Figura 6. Patrón de Altura Escalonado, modelo: SHS-1.8 QC.

El área denominada “escalones” ó “salto” será el lugar donde se efectúen las determinaciones de las magnitudes.

La figura 7 obtenida con el uso del Microscopio Confocal, muestra los dos planos de cuya diferencia se pretende determinar su altura.

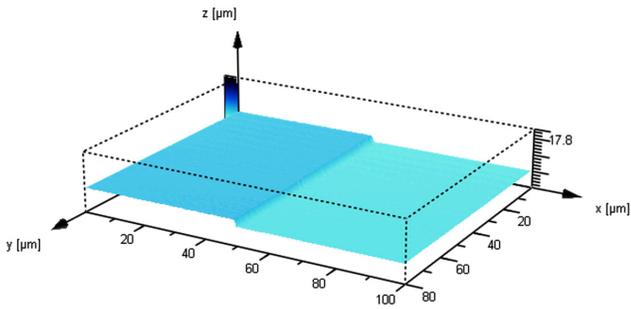


Figura 7. Diferencia de altura de los planos (Escalón).

Se considerarán 10 mediciones a lo largo de los escalones (ver figura 8) en 4 posiciones diferentes, originando un total de 40 valores, respectivamente. Cada segmento de línea corresponde al lugar donde se estimará la diferencia de alturas que coincide con la mostrada en la figura 9.

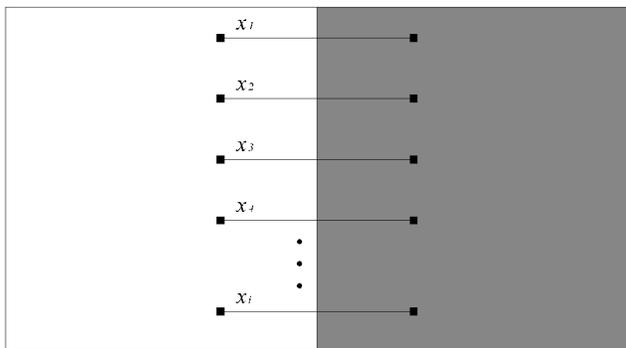


Figura 8. Determinación de las magnitudes en el Patrón de Altura Escalonado.

Automáticamente se genera una tabla y una gráfica (ver figura 9) que describe diferentes parámetros, pero dentro de los cuales se encuentra la diferencia de alturas (step height). Que es seleccionada mediante la línea que toca ambas alturas en un lugar donde las magnitudes se mantienen estables.

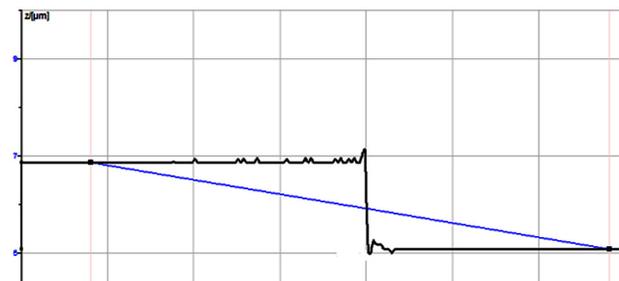


Figura 9. Gráfica de la diferencia de altura entre los dos planos (perfil).

Para ejemplificar sólo uno de los objetivos se mostrarán los resultados del objetivo 50x 0,5 con la disposición del patrón de P₁. En la tabla 4 el encabezado corresponde a las diferentes ampliaciones, hacia la izquierda las repeticiones correspondiente, y como producto del procesamiento de dicho datos la media y su desviación. Con los datos y las ecuaciones (1) y (2) mostradas en la siguiente sección se il-

eva a cabo la estimación de la incertidumbre. Con ello se procura obtener principalmente dos valores; la primera producto de la incertidumbre expandida (línea color cian de puntos redondos azules) y la segunda mediante el uso de una regresión lineal a lo largo de los diferentes objetivos (de color verde con triángulos) que finalizará en la línea de puntos negros y círculos blancos, ajustada con el propósito de no considerar valores menores de la incertidumbre. Estas líneas son las mostradas en los resultados que se analizarán posteriormente.

Z	Z ₁	Z ₂	Z ₃	Z ₄	Z ₅	Z ₆	Z ₈
1	1.64	1.66	1.71	1.64	1.73	1.66	1.67
2	1.59	1.63	1.70	1.66	1.70	1.63	1.62
3	1.65	1.63	1.68	1.71	1.71	1.65	1.69
4	1.63	1.58	1.69	1.73	1.73	1.62	1.59
5	1.67	1.59	1.64	1.62	1.67	1.62	1.64
6	1.66	1.60	1.69	1.62	1.65	1.61	1.57
7	1.66	1.73	1.65	1.66	1.69	1.66	1.63
8	1.77	1.67	1.68	1.69	1.68	1.60	1.67
9	1.64	1.70	1.70	1.67	1.71	1.64	1.67
10	1.69	1.67	1.67	1.65	1.74	1.67	1.65
Media	1.66	1.646	1.681	1.665	1.701	1.636	1.64
Desv.	0.05	0.05	0.02	0.04	0.03	0.02	0.04

Tabla 4. Ejemplo de los datos obtenidos para 50x 0,5 en la posición No.3 (P3).

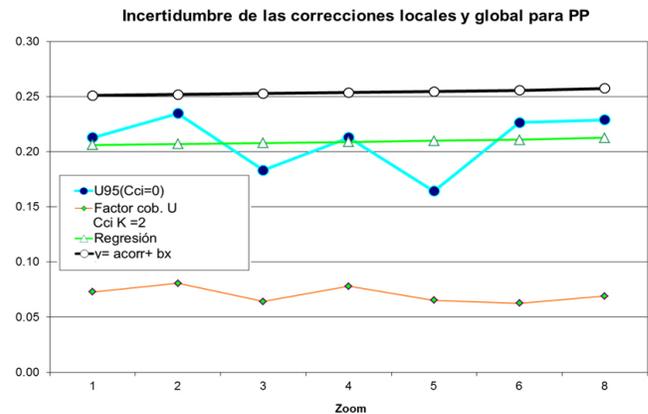


Figura 10. Gráficas que se obtienen de la estimación de la incertidumbre para 50x 0,5 en la posición No.3 (P3).

Estimación de la Incertidumbre

A continuación se detalla la estimación de la incertidumbre mediante la combinación de las contribuciones que se relacionan a continuación, Procedimiento DI-006 para la calibración de microscopios de medida, (1999):

$$u(\bar{c}_{ci}) = \sqrt{u_{pi}^2 + u_{ci}^2 + u_{inei}^2 + u_{ei}^2 + u_E^2} \quad (1)$$

u_{pi} = Incertidumbre del patrón (valor certificado de los patrones).

u_{ci} = Repetibilidad.

u_{inei} = Incertidumbre por inestabilidad de los patrones.

u_{θ_i} = Incertidumbre por diferencia de temperatura.

u_E = Incertidumbre por resolución del instrumento.

Para el caso de la Incertidumbre expandida será:

$$U=2u$$

Sí se considera que no se hacen correcciones, la incertidumbre expandida de acuerdo con el apartado F.2.4.5 de GUM, ISO y OTROS, (1995), $c_c=0$ la expandida asociada es:

$$U(c_c = 0) = \max U(c_{ci}) + \max |c_{ci}| \quad (2)$$

Discusión de Resultados

En las gráficas se distinguen las incertidumbres estimadas (P1 U95, P2 U95, P3 U95 y P4 U95), así como la regresión lineal que la representa en las diferentes ampliificaciones (P1, P2, P3 y P4).

Análisis de la estimación de la incertidumbre para la diferencia de alturas (1,8 μm), con el mismo objetivo pero con diferente ampliificación (zoom).

Objetivo 5x

Observando la figura 11 que contiene la Incertidumbre, producto de la diferencia de alturas (con un patrón de 1,8 μm), se observan algunos fenómenos interesantes:

La tendencia de los valores en general es a ir decayendo conforme el zoom aumenta por lo tanto conviene el uso del zoom mayor para las cuatro posiciones aunque entre la ampliificación 6 y 8 los resultados sean muy similares.

A partir del zoom 4 (y hasta el 8) la posición No.1 da indicios de ser la de menor incertidumbre, no obstante del zoom 1 al 3 la posición No.2 es la más idónea.

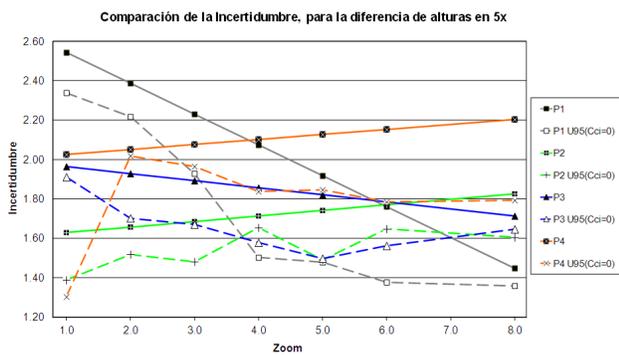


Figura. 11 Comparación de la Incertidumbre, para una diferencia de alturas en 5x.

La posición No.2 de forma muy general es la que mejor desempeño muestra a lo largo de la gráfica, pero no hay que descartar la posición No.1 en las dos últimas ampliificaciones.

Incertidumbre					
Zoom	P1	P1 U95(Cci=0)	Zoom	P2	P2 U95(Cci=0)
1	2.54	2.34	1	1.63	1.39
2	2.39	2.22	2	1.66	1.52
3	2.23	1.93	3	1.68	1.48
4	2.07	1.50	4	1.71	1.65
5	1.92	1.48	5	1.74	1.49
6	1.78	1.38	6	1.77	1.65
8	1.45	1.36	8	1.83	1.60
Zoom	P3	P3 U95(Cci=0)	Zoom	P4	P4 U95(Cci=0)
1	1.96	1.91	1	2.03	1.30
2	1.93	1.70	2	2.05	2.02
3	1.89	1.67	3	2.08	1.96
4	1.86	1.58	4	2.10	1.84
5	1.82	1.50	5	2.13	1.85
6	1.72	1.56	6	2.15	1.78
8	1.71	1.65	8	2.20	1.79

Tabla 5. Estimación de la incertidumbre (en μm) para el objetivo 5x con sus 7 ampliificaciones y en las 4 diferentes posiciones de evaluación (P1, P2, P3 y P4).

Objetivo 10x

Para el objetivo 10x es muy notorio el comportamiento, y la propensión en los siguientes aspectos:

Comparando con el objetivo anterior (5x) simple y sencillamente el objetivo 10x es superior, al considerar magnitudes que dejan fuera de cualquier duda, al ni siquiera coincidir en las escalas de las gráficas (ver figura 11).

En la figura 12 se muestra como bajo una gran gama de valores de las incertidumbres conforme se desplaza uno a la derecha, la agrupación de las incertidumbres se va compactando, es decir procura ser menor.

Destaca la posición No.3, pero la posición No.1 en ciertas condiciones resulta inclusive mejor, por lo tanto ambas se podrían usar indiferentemente, salvo que el experimento a desarrollar requiriera desarrollarse en las ampliificaciones más grandes (6 y 8).

En las ampliificaciones No.2 y No.3 coinciden valores pequeños de la incertidumbre por lo que ambas serían una opción a valorar.

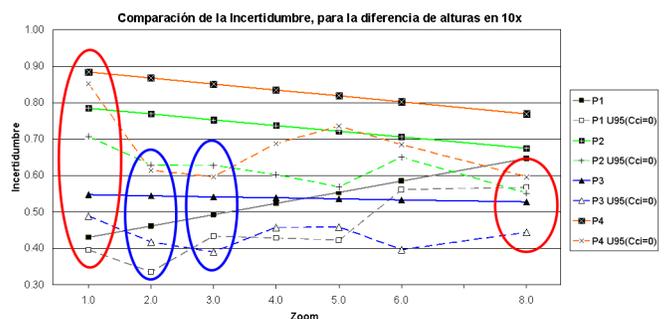


Figura 12. Comparación de la Incertidumbre, para una diferencia de alturas en 10x.

Incertidumbre					
Zoom	P1	P1 U95(Cci=0)	Zoom	P2	P2 U95(Cci=0)
1	0.43	0.40	1	0.78	0.71
2	0.46	0.33	2	0.77	0.63
3	0.49	0.43	3	0.75	0.63
4	0.52	0.43	4	0.74	0.60
5	0.55	0.42	5	0.72	0.57
6	0.59	0.56	6	0.71	0.65
8	0.65	0.57	8	0.67	0.65
Zoom	P3	P3 U95(Cci=0)	Zoom	P4	P4 U95(Cci=0)
1	0.55	0.49	1	0.88	0.85
2	0.54	0.42	2	0.87	0.61
3	0.54	0.39	3	0.85	0.60
4	0.54	0.46	4	0.83	0.69
5	0.54	0.46	5	0.82	0.73
6	0.53	0.40	6	0.80	0.68
8	0.53	0.44	8	0.77	0.60

Tabla 6. Estimación de la incertidumbre (en μm) para el objetivo 10x con sus 7 ampliificaciones y en las 4 diferentes posiciones de evaluación (P1, P2, P3 y P4).

Objetivo 20x

Para el objetivo 20x la figura 13 matiza algunas tendencias, pero en otras es clara enfatizar su mejor funcionalidad:

Ahora la ventaja del objetivo 20x con respecto al 10x no es tan evidente, pero valdrá con utilizar la posición No.1 en las ampliificaciones del 2 al 8 para ver un mejor desempeño.

En general y comparando las diferentes posiciones 20x es menor, pero habrá que tener cuidado en las condiciones para que dicha mejoría se mantenga.

Para la primera ampliificación se sugiere la posición No.3, pero salvo por este zoom, la posición No.1 es sobresaliente sobre las demás posiciones.

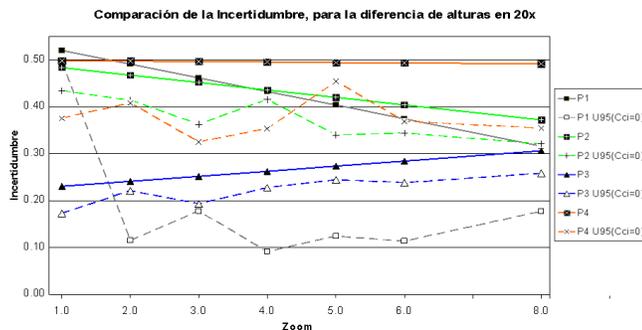


Figura 13. Comparación de la Incertidumbre, para una diferencia de alturas en 20x.

Incertidumbre					
Zoom	P1	P1 U95(Cci=0)	Zoom	P2	P2 U95(Cci=0)
1	0.52	0.49	1	0.48	0.43
2	0.49	0.12	2	0.47	0.41
3	0.46	0.18	3	0.45	0.36
4	0.43	0.09	4	0.44	0.42
5	0.40	0.12	5	0.42	0.34
6	0.37	0.11	6	0.40	0.34
8	0.32	0.18	8	0.37	0.32
Zoom	P3	P3 U95(Cci=0)	Zoom	P4	P4 U95(Cci=0)
1	0.23	0.17	1	0.50	0.38
2	0.24	0.22	2	0.50	0.41
3	0.25	0.19	3	0.50	0.33
4	0.26	0.23	4	0.50	0.35
5	0.27	0.25	5	0.49	0.46
6	0.28	0.24	6	0.49	0.37
8	0.31	0.26	8	0.49	0.35

Tabla 7. Estimación de la incertidumbre (en μm) para el objetivo 20x con sus 7 ampliificaciones y en las 4 diferentes posiciones de evaluación (P1, P2, P3 y P4).

En las posiciones No. 2 y No.4 al incrementar la ampliificación aminora la incertidumbre, pero no así con No.1 y No.3 que parecen mantenerse y ser muy estables, pero con la excepción de que tienen ambas menores magnitudes.

Objetivo 50x 0,5

El objetivo 50x 0,5 se mantiene en un rango comparable con el de 20x (ver figura 14) en cuanto a incertidumbre se refiere, pero habría que recalcar sólo algunas situaciones:

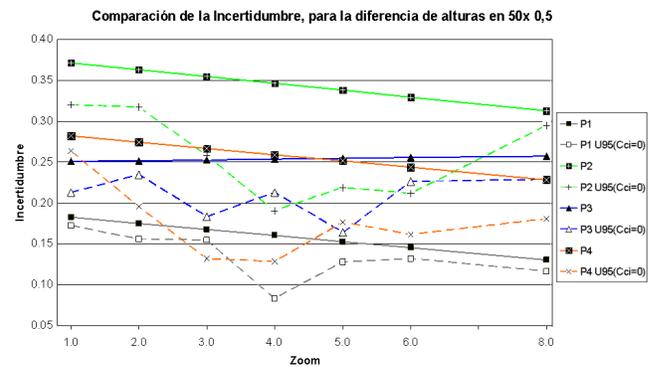


Figura 14. Comparación de la Incertidumbre, para una diferencia de alturas en 50x 0,5.

La posición No.1 en la ampliificación No.4 es la más óptima pero hay que ver que presentan valores muy estables a lo largo de las demás ampliificaciones.

En general todas las posiciones, al comparar el zoom No.1 con el No.8 suelen ser menores.

El zoom No.4 (salvo por la posición No.3) con respecto a las demás posiciones otorga las mejores apreciaciones.

Incertidumbre					
Zoom	P1	P1 U95(Cci=0)	Zoom	P2	P2 U95(Cci=0)
1	0.52	0.49	1	0.48	0.43
2	0.49	0.12	2	0.47	0.41
3	0.46	0.18	3	0.45	0.36
4	0.43	0.09	4	0.44	0.42
5	0.40	0.12	5	0.42	0.34
6	0.37	0.11	6	0.40	0.34
8	0.32	0.18	8	0.37	0.32
Zoom	P3	P3 U95(Cci=0)	Zoom	P4	P4 U95(Cci=0)
1	0.23	0.17	1	0.50	0.38
2	0.24	0.22	2	0.50	0.41
3	0.25	0.19	3	0.50	0.33
4	0.26	0.23	4	0.50	0.35
5	0.27	0.25	5	0.49	0.46
6	0.28	0.24	6	0.49	0.37
8	31	0.26	8	0.49	0.35

Tabla 8. Estimación de la incertidumbre (en μm) para el objetivo 50x 0,5 con sus 7 ampliificaciones y en las 4 diferentes posiciones de evaluación (P1, P2, P3 y P4).

Objetivo 50x 0,75

Al observar la figura 15 que contiene el comportamiento del objetivo 50x 0,75 las líneas que describen la incertidumbre tienen pendientes menores y por tanto decrecen con el incremento de la ampliificación, y con ello se suscitan ciertas circunstancias:

En relación al objetivo anterior su franja de valores son similares en sus incertidumbres más sin embargo en las menores magnitudes el objetivo de 50x 0,75 logra mejores resultados.

La posición No.1 del zoom No.1 al No.7 es una buena opción, y en la última se recurriría mejor a un cambio de posición (No.3).

El zoom No.5 en todas las posiciones brinda menores incertidumbres, al igual que la No.8.

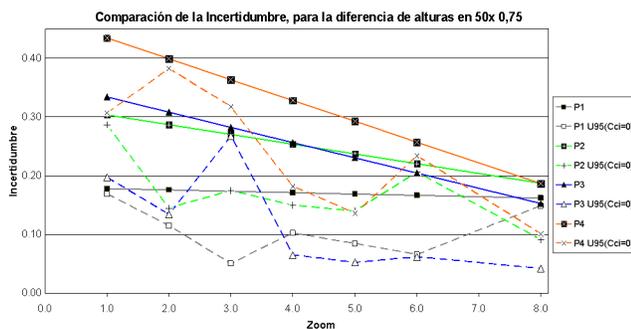


Figura 15. Comparación de la Incertidumbre, para una diferencia de alturas en 50x 0,75.

Incertidumbre					
Zoom	P1	P1 U95(Cci=0)	Zoom	P2	P2 U95(Cci=0)
1	0.18	0.17	1	0.30	0.29
2	0.18	0.11	2	0.29	0.14
3	0.17	0.05	3	0.27	0.17
4	0.17	0.10	4	0.25	0.15
5	0.17	0.08	5	0.24	0.14
6	0.17	0.07	6	0.22	0.21
8	0.16	15	8	0.19	0.09
Zoom	P3	P3 U95(Cci=0)	Zoom	P4	P4 U95(Cci=0)
1	0.33	0.20	1	0.43	0.31
2	0.31	0.13	2	0.40	0.38
3	0.28	0.27	3	0.36	0.32
4	0.26	0.06	4	0.33	0.18
5	0.23	0.05	5	0.29	0.14
6	0.20	0.06	6	0.26	0.23
8	0.15	0.04	8	19	0.10

Tabla 9. Estimación de la incertidumbre (en μm) para el objetivo 50x 0,75 con sus 7 ampliificaciones y en las 4 diferentes posiciones de evaluación (P1, P2, P3 y P4).

Objetivo 100x

Siendo 100x la máxima ampliificación del equipo se supondría con una considerable superioridad con los demás objetivos, pero para ello es mejor dar una breve descripción de su comportamiento:

Entre 50x 0,75 y 100x las diferencias no son marcadas, inclusive con una variedad de ampliificaciones (No.3 al No.8) 50x 0,75 tiene menores incertidumbres.

Pero de la figura 16 se deduce un buen desempeño de la ampliificación No.6 para todas las posiciones.

La posición No.1 es la que a lo largo de sus diferentes ampliificaciones cede las menores incertidumbres, y por lo tanto la que se sugiere para su operación.

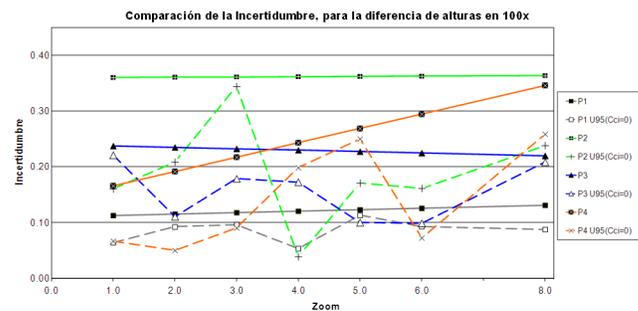


Figura 16. Comparación de la Incertidumbre, para una diferencia de alturas en 100x.

Incertidumbre					
Zoom	P1	P1 U95(Cci=0)	Zoom	P2	P2 U95(Cci=0)
1	0.11	0.06	1	0.36	0.16
2	0.12	0.09	2	0.36	0.21
3	0.12	0.10	3	0.36	0.34
4	0.12	0.05	4	0.36	0.04
5	0.12	0.11	5	0.36	0.17
6	0.13	0.09	6	0.36	0.16
8	0.13	0.09	8	0.36	0.24
Zoom	P3	P3 U95(Cci=0)	Zoom	P4	P4 U95(Cci=0)
1	0.24	0.22	1	0.17	0.07
2	0.23	0.11	2	0.19	0.05
3	0.23	0.18	3	0.22	0.09
4	0.23	0.17	4	0.24	0.20
5	0.23	0.10	5	0.27	0.25
6	0.22	0.10	6	0.29	0.07
8	0.22	0.21	8	0.35	0.26

Tabla 10. Estimación de la incertidumbre (en μm) para el objetivo 100x con sus 7 ampliificaciones y en las 4 diferentes posiciones de evaluación (P1, P2, P3 y P4).

Conclusiones

Las diferentes ampliificaciones del equipo en cada objetivo son determinantes para menores incertidumbres, y el desempeño por lo general se asocia a una mayor ampliificación con una menor incertidumbre.

Para la determinación de las diferencias de altura, se comprobó que aún cuando el fabricante establece magnitudes mínimas de discretización, el equipo no tiene el alcance para avalarlas y por lo tanto cada vez que se oferta un equipo debería estar acompañado de un estudio de este tipo que dictamine sus capacidades. El procedimiento utilizado analizó toda una serie de condiciones que afectan la estimación de la incertidumbre, como fueron la posición en la cual se toman las mediciones y sus diferentes ampliificaciones, por ello sería conveniente tomarlas en cuenta para el desarrollo de estudios posteriores.

En comparación con otros equipo como los rugosímetros con incertidumbres en equipos convencionales de $0,1 \mu\text{m}$, comparadores ópticos y microscopios de medición con $3 \mu\text{m}$, microscopio de fuerzas atómicas $0,09 \mu\text{m}$ el microscopio confocal da muestras de su competencia al lograr hasta $0,04 \mu\text{m}$ en las mejores estimaciones.

El presente trabajo abre la posibilidad en el diseño de patrones con virtudes cuyo objetivo sea un análisis completo y dinámico del proceso.

Muchos equipos en la actualidad carecen de éste tipo de estudios, y por lo tanto sería muy razonable ofertarlos con una propuesta de las incertidumbres encontradas, y en consecuencia asociarle su grado de dispersión al equipo.

Agradecimientos

Al Fondo de Apoyo a la Investigación (FAI) de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí, así como al PROMEP por el Apoyo de fomento a la generación y aplicación innovadora del conocimiento con número de profesor: UASLP-PTC-283.

Referencias bibliográficas

Soto Eguibar E. *La microscopia confocal. Elementos*, No.17. (1993) 35. Centro de Ciencias Fisiológicas. Instituto de Ciencias de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. México.

Yao N and Wang Z L. *Handbook of microscopy for nanotechnology*. Ed. Kluwer Academic Publishers. ISBN: 1402080034. New York, USA 2005.

R. Breil, T. Fries, J. Garnaes, J. Haycocks, D. Hüser, J. Joergensen, W. Kautek, L. Koenders, N. Kofod, K.R. Koops, R. Korntner, B. Lindner, W. Mirandé, A. Neubauer, J. Peltonen, G. B. Picotto, M. Pisani, H. Rothe, M. Sahre, M. Stedman and G. Wilkening. *Intercomparison of scanning probe microscopes*. Precision Engineering 26 (2002) 296-305.

Dai G, Pohlenz F, Xu M, Koenders L, Danzebrik H U and Wilkening G. *Accurate and traceable measurement of nano- and microstructures*. Measurement Science and Technology (2006) 17 545-552.

De Chiffre L, Kunzmann H., Peggs G., Lucca D. *Surfaces in precision engineering, microengineering and nanotechnology*, Annals of the CIRP, (2003) 52/2:561-578.

Procedimiento DI-006 para la calibración de microscopios de medida. Centro Español de Metrología. Madrid: Ministerio de Industria y Energía: Ministerio de Fomento, [1999] 36 p.; 21 cm.

ISO y OTROS: "Guide to the expression of uncertainty in measurement", 1ª Edición corregida y reimpressa, ISBN 92-67-10188-9, 101 páginas, 1995, Suiza.