



**Universidad**  
Zaragoza

TRABAJO FIN DE GRADO

Análisis del comportamiento metrológico de un microscopio de  
variación focal

Analysis of the metrological performance of a focus variation  
microscope

Autor

**Iván Benedí Matute**

Directores:

**José Antonio Albajez García**

**Lucia Díaz Pérez**

Titulación del autor

**Ingeniería de tecnologías industriales**

Escuela de Ingeniería y Arquitectura

2021/2022

# Resumen

## Análisis del comportamiento metrológico de un microscopio de variación focal

Uno de los grandes fines en los que se utiliza la microscopia de variación focal es para verificar la longitud de las superficies. Estas verificaciones, especialmente en procesos de calidad están sujetas a diferentes errores que pueden afectar en mayor o menor medida a la medición.

En este trabajo se evalúan la influencia de ciertos parámetros del microscopio InfineFosuSL de Alicona, diferentes situaciones que se pueden dar al medir diferentes longitudes y cuál es la repetibilidad del operario en diferentes ejes. Para ello se utilizan dos patrones calibrados diferentes, el patrón IF-Verification Tool y el patrón IF-Calibration Tool. Además, para poder analizar y entender los resultados se explica que es la microscopia de variación focal, cuáles son sus componentes y aplicaciones, así como sus ventajas y limitaciones.

En la parte final del trabajo, se resume su contenido haciendo una lista de recomendaciones a seguir por parte del operario para disminuir los errores asociada a esas mediciones, bien porque la desviación de una serie de medición es más alta de lo normal o porque el valor de la longitud a verificar es diferente del esperado.

## Abstract

### Analysis of the metrological performance of a focus variation microscope

One of the great purposes in which focal variation microscopy is used is to verify the length of surfaces. These verifications, especially in quality processes, are subject to different errors that can affect the measurement to a greater or lesser extent. This paper evaluates the influence of some parameters of the Alicona InfiniteFocusSL microscope, different situations that can occur when measuring different lengths and what is the repeatability of the operator in different axes. To do this, two different calibrated gauge blocks are used, the IF-Verification Tool gauge block and the IF-Calibration Tool pattern. In addition, to analyze and understand the results, it explains what focal variation microscopy is, what its components and applications are, as well as its advantages and limitations. In the final part of the work, its content is resumed by making a list of recommendations to be followed by the operator to reduce the errors associated with these measurements, because the value of the length to be checked is different from what is expected.

Resumen	2
1. Introducción	7
1.1 Objeto y alcance del proyecto de la investigación	8
2. Microscopía de variación focal	9
2.1 Principio de funcionamiento	9
2.2 Componentes del MVF	10
2.3 Ventajas y aplicaciones de FVM	12
2.4 Limitaciones	12
2.5 InfiniteFocusSL de Alicona	12
3. Tipos de ensayo realizados y sus resultados	15
3.1 Evaluación de la repetibilidad del operario	16
3.1.1 Análisis de la repetibilidad del operario en el eje X	16
3.1.2 Análisis de la repetibilidad del operario en el eje Z	18
3.2 Análisis de las medidas de profundidad en el plano Z	20
3.3 Análisis de las medidas de longitud en el plano XY	21
3.3.1 Análisis de las medidas tomadas en el eje X	21
3.3.2 Análisis de las medidas tomadas en el eje Y	22
3.3.3 Discusión al relacionar las medidas tomadas en el eje X con el eje Y	23
3.4 Análisis de la variación de la luminosidad	26
3.5 Análisis sobre la variación de altura (eje z)	29
3.6 Análisis de la variación de las mediciones cuando se realiza un cambio de lente	31
3.7 Análisis sobre la unión de dos imágenes y su influencia en la medida.	33
4. Recomendaciones	35
5. Conclusiones	36
6. Bibliografía	37

## Índice de tablas

Tabla 1. Parámetros más importantes del microscopio InfiniteFocusSL.....	13
Tabla 2. Parámetros utilizados en la medición de la repetibilidad del operario en el eje X... 17	17
Tabla 3. Resultados de las mediciones en el eje X de la repetibilidad del operario.....	17
Tabla 4. Parámetros utilizados en la medición de la repetibilidad del operario en el eje Z... 18	18
Tabla 5. Resultados de las mediciones en el eje Z de la repetibilidad del operario.....	18
Tabla 6. Parámetros utilizados en las mediciones del eje Z.....	20
Tabla 7. Resultados de las mediciones en el eje Z. ....	20
Tabla 8. Parámetros utilizados en las mediciones del eje X e Y.....	21
Tabla 9. Resultados de las mediciones en el eje X.....	21
Tabla 10. Resultados de las mediciones en el eje Y.....	22
Tabla 11. Resultados completos de la serie de mediciones de 0,5 mm.....	23
Tabla 12. Resultados de las mediciones de 1 mm en el eje X con diferente orientación.....	24
Tabla 13. Parámetros utilizados en las mediciones del eje X cambiando la luminosidad.....	27
Tabla 14. Resultados de las mediciones de 1 mm en el eje X para las diferentes luminosidades.....	27
Tabla 15. Resultados de las mediciones de 1 mm en el eje X para las diferentes alturas....	30
Tabla 16. Resultados de las mediciones del escalón de 1 mm con cambio de lente y sin cambio de lente. ....	31
Tabla 17. Resultados de las mediciones de 1 mm en el eje X con uniones y sin uniones....	33
Tabla 18. Resultados de las mediciones de 0,5 mm en el eje X con uniones y sin uniones.	34

## Índice de gráficas

Gráfica 1. Error absoluto de las mediciones para mediciones para	Gráfica 2. Error relativo de las mediciones para
17	17
Gráfica 3. Error absoluto de las mediciones para mediciones para	Gráfica 4. Error relativo de las mediciones para
19	19
Gráfica 5. Comparativa de la medición	Gráfica 6. Comparativa de la medición.....23
Gráfica 7. Comparativa de la medición de	Gráfica 8. Comparativa de la medición de..23
Gráfica 9. Representación de los resultados de las mediciones de 1 mm en el eje X con diferente orientación. ....25	
Gráfica 10. Representación de los resultados de las mediciones de 1 mm en el eje X con diferente luminosidad.....27	
Gráfica 11. Representación de los resultados de la medición de 1 mm en el eje X a varias alturas. ....30	
Gráfica 12. Representación de los resultados obtenidos en las mediciones del escalón de 1 mm con cambio de lente y sin cambio de lente.....32	
Gráfica 13. Representación de los resultados de las mediciones de 1 mm en el eje X con uniones y sin uniones. ....34	
Gráfica 14. Representación de los resultados de las mediciones de 0,5 mm en el eje X con uniones y sin uniones. ....34	

## Índice de figuras

Figura 1. Componentes de un microscopio de variación focal. Fuente: Especificación geométrica de productos (GPS). Calidad superficial: Áreas. Parte 606: Características nominales de instrumentos sin contacto (con variación focal) .....	9
Figura 2. Diferenciación entre las posibles opciones en las que se puede encontrar la superficie. Fuente: Calibration of focus variation microscopy for surface texture measurement.....	10
Figura 3. Diferentes tipos de iluminación. Fuente: Calibration of focus variation microscopy for surface texture measurement.....	11
Figura 4. Microscopio InfiniteFocusSL de Alicona.....	13
Figura 5. Medidas realizadas para evaluar la repetibilidad del operario en el eje X. ....	16
Figura 6. Escalones del patrón IF-Verification Tool a medir en la repetibilidad del operario en el eje Z. ....	18
Figura 7. Medidas tomadas en el eje Y. ....	22
Figura 8. Imágenes sobre las que se han tomado las medidas de 1 mm con diferente orientación. ....	24
Figura 9. Resultados en la imagen capturada al cambiar el parámetro de la luminosidad. ...	26
Figura 10. Imagen con 64,3 ns de luminosidad.                      Figura 11. Imagen con 24,3 ns de luminosidad.                      28	
Figura 12. Altura base o cero.                      Figura 13. 5,76 milímetros de altura. ....	29
Figura 14. 9,70 milímetros de altura.                      Figura 15. 12,35 milímetros de altura.....	29
Figura 16. Enroscado y desenroscado de la lente.                      Figura 17. Lente desenroscada del orificio del microscopio.                      31	
Figura 18. Imagen sobre las que se realizan las medidas al unir dos capturas de imagen. .	33

# 1. Introducción

En la actualidad, las mediciones tienen una gran importancia, tanto en la vida cotidiana como en numerosas disciplinas, como pueden ser la ciencia o la ingeniería. Para comenzar este trabajo, por ello, se debe definir con claridad cuál es el significado de la palabra medición. Según el vocabulario internacional de metrología (VIM) la definición de medición es la siguiente:

*‘Proceso que consiste en obtener experimentalmente uno o varios valores que pueden atribuirse razonablemente a una magnitud [1, p. 27].’*

La metrología es la ciencia que estudia las mediciones, además de sus aplicaciones. La metrología incluye todos los aspectos teóricos y prácticos de las mediciones, teniendo en cuenta su incertidumbre de medida y su campo de aplicación [1, p. 27].

La metrología es muy importante en la industria tanto para las empresas como para sus clientes. Ambos necesitan saber con suficiente exactitud cuanto mide una pieza, o cuales son las variaciones dimensionales admisibles, desde la etapa de diseño hasta la de etapa en la que el producto ya está terminado, pasando por la de producción o la de inspección de calidad del producto [2, p. 2]. Por ello, las empresas deben contar con instrumentos de medición adecuados, para obtener medidas en las que el cliente pueda confiar y garantizar buenos resultados en estos procesos [3]. La medición se ha convertido en un aspecto fundamental en la fabricación al mejorar muchos de sus procesos, por ejemplo, poder verificar dimensiones de una muestra que ha sido mecanizada de forma precisa es fundamental para poder optimizar la calidad de fabricación. Además, al realizar estas mediciones se puede tener un mayor control en el proceso y detectar cuales son las condiciones de trabajo más favorables para poder obtener los mejores resultados [2, p. 2].

Para la verificación de las dimensiones de una muestra se pueden usar multitud de instrumentos diferentes, desde un pie de rey o una regla graduada hasta instrumentos mucho más complejos como pueden ser los microscopios de variación focal o las máquinas de medición por coordenadas. La principal ventaja de los microscopios con respecto a las máquinas de medir por coordenadas (MMCs) es que pueden medir en escalas más pequeñas, es decir, tienen una precisión en la medición mayor. Por otro lado, los microscopios suelen ocupar un espacio menor en el laboratorio y su coste es menos elevado que el de las MMCs. Además, las MMCs necesitan seguir una capacitación exhaustiva para obtener mediciones correctas, mientras que los microscopios tienen una mayor facilidad de uso [4]. Por otro lado, el campo de medida de los microscopios está limitado, y es mucho menor que el de las MMCs. Con esta comparación no se quiere decir que un instrumento de medida es mejor que el otro ya que no compiten entre ellos, al ser utilizados para medir rangos de medición y precisiones distintas.

## 1.1 Objeto y alcance del proyecto de la investigación

En el laboratorio de metrología situado en el Escuela de Ingenieros y Arquitectos (EINA) de la Universidad de Zaragoza hay un microscopio de variación focal que se usa en diversos proyectos de investigación para tomar medidas de referencia. Para obtener una medida lo más precisa posible no basta solo con utilizar instrumentos de medición muy potentes como pueden ser los MVF o las MMC, sino que también es muy importante configurar de forma correcta los parámetros del instrumento, formar a los operarios para medir con destreza o saber qué factores empeoran la precisión de la medida. Por esto es necesario caracterizar el funcionamiento de este instrumento y ver que parámetros de su configuración afectan al error final de la medida y cuales son más importantes.

Por otro lado, la incertidumbre de calibración asociada a los patrones proporcionadas en el certificado de calibración se da para un tipo de medida en concreto, como puede ser la longitud de un escalón, en los que se ha utilizado una configuración específica de todas las posibles combinaciones de valores para los parámetros del microscopio. Además, este certificado tampoco especifica que ocurre si se realiza la misma medición en un eje diferente, ni que ocurre cuando se cambian los parámetros de funcionamiento del microscopio o cuando se modifica la altura de medición. Por ello, el objetivo del presente trabajo consiste en analizar la precisión del microscopio en diferentes geometrías de medición simulando condiciones de trabajo más realistas.

En primer lugar, se estudiará como mide un MVF, cuáles son sus componentes y cuáles son los parámetros más importantes que hay que ajustar para obtener una medida dimensional. El microscopio tiene un rango de medición de 25 mm en el eje vertical, que se puede ajustar de forma manual en un rango de 13 mm y ofrece la posibilidad de cambiar la lente. InfiniteFocus SL captura imágenes de 2 mm × 2 mm y para medir longitudes mayores ofrece la posibilidad de 'stitching', es decir, unir diferentes imágenes sin que se vea afectada en gran medida su precisión.

El trabajo tratará de aclarar cuales son las condiciones óptimas de medida para este microscopio en concreto, tratando de responder preguntas como si la repetibilidad de medición por parte del operario es la misma al medir cualquier distancia en cualquier eje, si el proceso del cambio de lente o medir a diferente altura induce alguna diferencia en la medición. Por otro lado, también se discutirá cómo afectan los parámetros del microscopio y se comparan varias mediciones con 'Stitching' y sin él sobre la misma longitud de medida.

Para dar respuesta a todo esto se realizaron ensayos en dos patrones de medición diferentes, el patrón IF-Verification Tool para las medidas en el eje X e Y, y el patrón IF-Calibration Tool para las medidas en el eje Z. En estos ensayos se han tomado 10 mediciones diferentes por cada longitud de medida a verificar cambiando las condiciones de medida. En el apartado 4.Recomendaciones se encuentran expuestas una serie de recomendaciones sugeridas para futuros ensayos con el microscopio InfiniteFocusSL del departamento de metrología de la Universidad de Zaragoza.

## 2. Microscopía de variación focal

El microscopio InfiniteFocus SL es un microscopio de variación focal, por ello, se muestra a continuación la definición de microscopía de variación focal de la norma ISO 25178-6:2010, 3.3.9:

*'Método de medición de la topografía de la superficie mediante el cual la nitidez de la imagen de la superficie (u otra propiedad de la luz reflejada en el enfoque óptimo) en un microscopio óptico se utiliza para determinar la altura de la superficie en cada posición a lo largo de la superficie [5, p. 13].'*

La variación focal es capaz de proporcionar información topográfica y de color gracias a la variación de enfoque, que combina la profundidad de enfoque de un sistema óptico con el escaneo vertical [6, p. 56]. Para realizar una medición completa de la superficie, la óptica se mueve verticalmente a lo largo del eje óptico mientras se capturan continuamente los datos de la superficie. Esto garantiza que cada región de la medición esté correctamente enfocada y no haya una pérdida de información [6, p. 56]. Para comprender mejor este concepto se explicará cuál es su principio de funcionamiento.

### 2.1 Principio de funcionamiento

Los microscopios de variación focal suelen estar formados por la fuente de luz blanca, la lente, polarizador, espejo divisorio (semitransparente), objetivo de la lente, superficie de la muestra o espécimen, analizador, sensor de dispositivo de carga acoplada (CCD) el anillo de luz, analizador y el haz de luz [5].

Estos componentes se muestran en la figura 1:

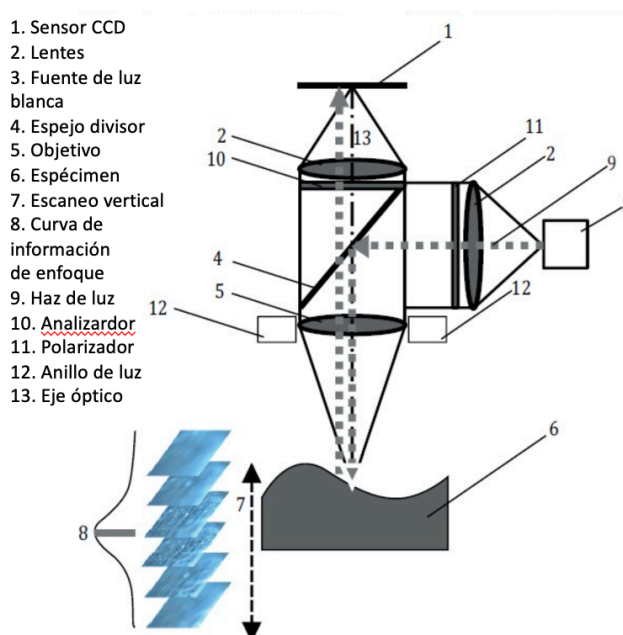


Figura 1. Componentes de un microscopio de variación focal. Fuente: Especificación geométrica de productos (GPS). Calidad superficial: Áreas. Parte 606: Características nominales de instrumentos sin contacto (con variación focal)

El microscopio óptico contiene varias lentes que pueden combinarse con diversos objetivos que permiten mediciones con mayor o menor resolución. La luz o el haz luminoso sale de la fuente de luz blanca y gracias al espejo divisor se inserta en la trayectoria óptica del sistema para que acabe llegando a la muestra, pasando antes por el objetivo. [5, p. 28].

La topografía de la muestra o espécimen es muy importante. La luz se dispersa fuertemente en todas las direcciones cuando la topografía de la muestra tiene propiedades difusas, en cambio, si la reflexión es especular, refleja la luz principalmente en una dirección. Los rayos reflejados en la muestra y que golpean en la lente del objetivo se recogen mediante un sensor sensible a la luz colocado detrás del espejo de división de haz [5, p. 28].

Los MVF son muy precisos, pero solo enfocan nítidamente una pequeña parte de la muestra, por lo que la óptica se debe mover verticalmente a lo largo del eje óptico mientras se van capturando de forma continua los datos de la superficie, es decir, en cada una de las posiciones verticales del escáner, se enfoca nítidamente solo una región [5, p. 28].

Una vez se ha recorrido toda la muestra que se desea medir, todos los datos adquiridos se convierten a una imagen 3D gracias a los algoritmos. Estos hacen que se puede reproducir una imagen a color para facilitar las mediciones y la identificación de algunas de posibles defectos conservando la información de la altura de cada punto escaneado [5, p. 28].

Al cambiar el enfoque puede que se vea afectado el contraste en el sensor CCD. Hay un algoritmo encargado de analizar la variación de enfoque para cada píxel en una imagen y así poder reconstruir la imagen tanto en 2D como 3D repitiendo este proceso en cada posición lateral generando las imágenes en color y la información de profundidad. La Figura 2 muestra el proceso de reconstrucción de superficies 2D a partir de la recopilación de las imágenes del FVM [2, p. 38].

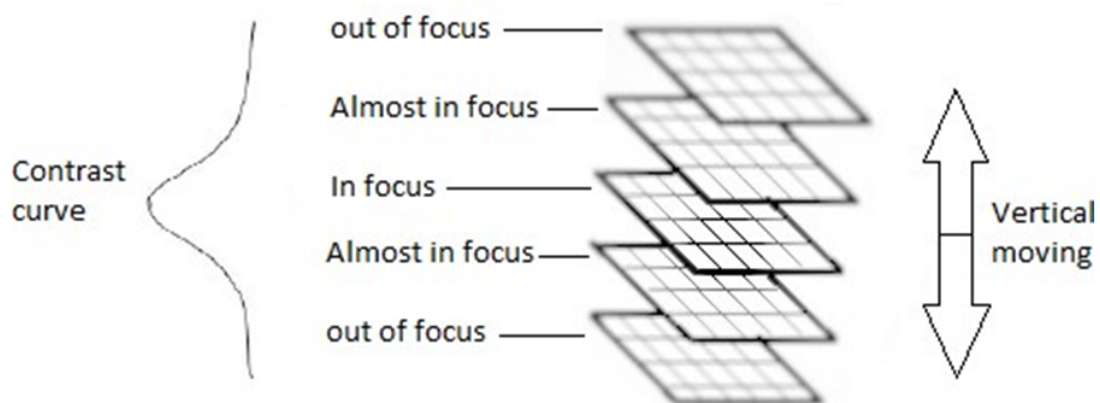


Figura 2. Diferenciación entre las posibles opciones en las que se puede encontrar la superficie. Fuente: Calibration of focus variation microscopy for surface texture measurement.

## 2.2 Componentes del MVF

- Fuente de luz

La fuente de luz ha sido definida por la norma ISO25178-606 (2015) como:

"Fuente de luz que contiene un continuo de longitudes de onda en un rango espectral y espacial predefinido" [5, p. 14].

Las diferentes formas de proyección de luz están representadas en la siguiente figura, para instrumentos ópticos generales y son iluminación coaxial (1), iluminación anular (2), iluminación puntual (3) iluminación difusa (4) e iluminación de campo oscuro (5) [2, p. 40].

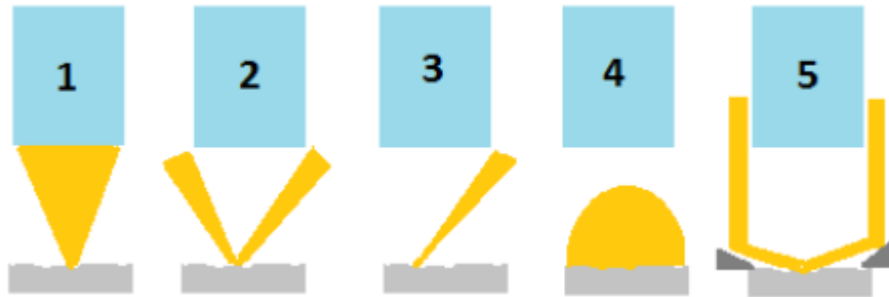


Figura 3. Diferentes tipos de iluminación. Fuente: Calibration of focus variation microscopy for surface texture measurement.

Para elegir qué tipo de iluminación es el mejor para la medición hay que tener en cuenta el material sobre el que se va a realizar la medida. En función de la luz del anillo que se haya escogido puede proporcionar más información de la superficie y aumentar la capacidad de medir superficies de pendiente alta [2, p. 40].

En la FVM se utilizan diodos emisores de luz que son muy estables, con una larga vida útil y permite que el sensor detecte el color. El elemento número 13 de la figura 1, el polarizar, se encarga de generar la luz polarizada necesaria para iluminar el espécimen. Además, tiene una gran utilidad cuando se va a medir una superficie altamente reflectante ya que ayuda a reducir los componentes especulares que afectan al sensor CCD [2, p. 40]. Posteriormente, el analizador es el encargado de filtrar la luz reflejada en el espécimen, antes de que llegue al sensor CCD [2, p. 40].

- Sensor de dispositivo de carga acoplada (CCD)

El sensor de dispositivo de carga acoplada es el número 1 en la figura 1. Este sensor se encarga de captar la luz reflejada de la superficie medida para analizar los datos, por ello, el CCD debe tener dos características esenciales, la primera una alta resolución espacial para minimizar la región de cálculo del foco y la segunda, una alta resolución radiométrica para mejora el cálculo del foco de muestras de bajo contraste.

- Unidad de control

La unidad de control o la unidad motriz es vital para garantizar una buena precisión de la medición y la confiabilidad de los datos responsable, ya que es la encargada de controlar los movimientos de los ejes X, Y, y Z del MVF. No se puede realizar movimientos verticales y horizontales a la vez. La unidad motriz también es la encargada de escanear verticalmente una superficie y de mover una muestra en lateral (x-y) dirección [2, p. 41].

- Objetivo

El objetivo se utiliza para capturar la luz reflejada de la muestra y además, amplificar un área de medición pequeña para obtener una mayor precisión en la medida. Dependiendo del tipo de MVF hay diferentes lentes de aumento, que pueden ir desde 2,5x hasta 100x aunque a lo largo del trabajo solo se va a usar la lente de aumento 10x. Estos aumentos tienen una resolución, profundidad de campo, distancia de trabajo, apertura numérica del objeto y campo de visión diferentes. Por ello, no todas las lentes se pueden utilizar para realizar todo tipo de mediciones y es conveniente elegir un aumento correcto para poder realizar medidas más precisas [2, p. 41].

## 2.3 Ventajas y aplicaciones de FVM

Las principales ventajas son:

- La MVF es un sistema de medición fácil de usar y con una gran velocidad a la hora de realizar las medidas [6, p. 28].
- Con esta tecnología se puede recopilar la información de la profundidad combinado con el color real de la superficie, lo que permite delimitar el principio y el final de las zonas a medir de una forma sencilla o visualizar imperfecciones o suciedad [2, p. 41]
- La luz anular permite que FVM mida superficies con pendientes elevadas que superan los 80° [2, p. 41].

Por otro lado, las aplicaciones de esta tecnología son muy amplias usándose tanto en aplicaciones industriales de herramientas como en aplicaciones en controles de calidad. También se puede usar para medir posiciones superficies de difícil acceso.

## 2.4 Limitaciones

La mayor limitación de este equipo tiene que ver con las muestras que puede medir, ya que si se encuentra ante una superficie transparente, ya que la luz se refleja en todas las direcciones y el sensor CCD recibe poca información y por lo tanto imagen calculada no será la correcta. Para solucionar esto se puede utilizar un material de revestimiento, pero no siempre se puede utilizar porque reduce la precisión en la medida [2, p. 42] [5, pp. 22,23].

Por otro lado, también tiene algunas limitaciones al medir rugosidades superficiales, pero no es un tema que se trate en el trabajo.

## 2.5 InfiniteFocusSL de Alicona

El instrumento InfiniteFocusSL de Alicona que se encuentra en el laboratorio de metrología de la Universidad de Zaragoza y que se utiliza en este trabajo (Figura 2) es un microscopio óptico de variación de foco que permite medir formas, acabados y superficies con microestructuras.



Figura 4. Microscopio InfiniteFocusSL de Alicona.

InfiniteFocusSL es un sistema de medición 3D óptico para la medición fácil, rápida y rastreable de la forma, la longitud y el acabado en diferentes superficies. Además, como es un MVF se consiguen imágenes en color con alto contraste y profundidad de foco [7], [8]. Los parámetros de medida del microscopio de Alicona marcan las características de la medida. Las características más importantes de este microscopio se muestran en la tabla 1 para una lente de magnificación 10x, que es la que se usa en el trabajo [8, p. 8]. Para obtener más información técnica sobre el microscopio se recomienda acudir al Anexo IV.

Distancia óptima de trabajo	17,5 mm
Área de escaneado	2 mm x 2 mm
Resolución vertical	> 100 nm
Resolución lateral	~ 3 $\mu$ m
Altura de escaneo	< 22 mm
Área máxima de medida	50 mm x 50 mm
Rugosidad mínima de medida (Ra)	0.3 $\mu$ m

Tabla 1. Parámetros más importantes del microscopio InfiniteFocusSL.

A continuación, aparecen descritos los parámetros que afectan a la medición por parte del microscopio y que el operario que ha realizado la medida pudo ajustar:

- **Brightness:** Se refiere al brillo o luminosidad, y se define como la luz emitida por el microscopio para iluminar el objeto que se desea medir. Este término está directamente relacionado con la claridad de los colores. Un buen ajuste de la luminosidad permite ver con claridad los objetos, pero si al ajustar este parámetro se utiliza un brillo mayor, la imagen comienza a perder intensidad y todos los colores se acercan al blanco, empeorando la calidad de la imagen [10].

- **Contrast:** Se refiere al contraste y se define como la diferencia relativa de intensidad que existe entre un punto de una imagen y sus alrededores. Al cambiar el contraste cambiara la facilidad para distinguir un objeto de su fondo. Cuando el valor del parámetro de contraste es cero, es imposible distinguir el objeto de su fondo. El contraste también se entiende como la cantidad de tonos intermedios que hay entre el objeto y el fondo. Por ejemplo, para identificar claramente cuál es el principio de la zona que se desea medir, interesa tener un valor de contraste alto [9].
- **Resolution:** Se refiere a la resolución de una imagen y en el microscopio se pueden definir la resolución vertical y la resolución lateral. La resolución se define como la distancia más pequeña entre dos puntos del espécimen que todavía puede distinguirse como dos formas separadas [11]. Por ello, la resolución vertical delimitará cual es la capacidad para distinguir dos puntos diferentes en diferentes profundidades, y la resolución lateral determinara cual es la capacidad para distinguir dos puntos, uno al lado del otro [5, p. 6].
- **Upper:** Se utiliza cuando se va a medir una superficie de 2 mm x 2 mm y se refiere al valor más alto que el microscopio va a tener en cuenta en la medición. Por lo tanto, a la hora de definir este valor, siempre se debe desenfocar el microscopio hacía arriba para que todos los valores que se desea medir se encuentran por debajo de este.
- **Lower:** Parámetro que tiene la misma función que el Upper, pero que delimita la parte inferior sobre la que se va a realizar la medida de una imagen 2 mm x 2 mm. Para asegurarse que el microscopio mide todos los puntos deseados hay que desenfocar el microscopio, moviendo el eje Z hacia abajo.

### 3. Tipos de ensayo realizados y sus resultados

A continuación, se han descrito uno por uno cada uno de los ensayos, como se han realizado y cuál ha sido la conclusión obtenida en cada uno de ellos, pero antes se procede a explicar cuáles van a ser los parámetros a estudiar en estos ensayos.

En primer lugar, se ha estudiado cual es la incidencia del operario en la medición y si es la misma en la medición de escalones que en la medición de una longitud horizontal (Punto 3.1). Una vez definida la repetibilidad del operario se ha estudiado la repetibilidad del microscopio, tanto en el eje Z (Punto 3.2), como en el eje X e Y y en el plano que forman estos dos últimos ejes variando la orientación del patrón sobre el que se realizaran las medidas (Punto 3.3).

En segundo lugar, se ha analizado el cambio de valor en algunos parámetros, en concreto en el brillo o luminosidad del microscopio, ya que es un valor que depende en gran medida del material del objeto sobre el que se mide (Punto 3.4). El resto de los parámetros no se han estudiado porque el fabricante del microscopio proporciona unos valores recomendados en función del tipo de lente utilizada.

También se ha estudiado el comportamiento de la medida ante un cambio en su altura de medición tomándose como altura inicial o cero la altura a la que se realizan las mediciones cuando el patrón toca la base del microscopio y posteriormente se ha ido elevando el microscopio (Punto 3.5).

Por otro lado, se ha estudiado como afecta el cambio de lente a la medición (Punto 3.6) y, por último, como afecta la técnica de unir dos imágenes. Para ello, se han realizado diversas entre la zona de unión para comprobar si hay un error al unir dos imágenes (Punto 3.7).

Para estos ensayos se han utilizado dos patrones diferentes, para obtener más información sobre ellos se recomienda acudir al anexo 2.

## 3.1 Evaluación de la repetibilidad del operario

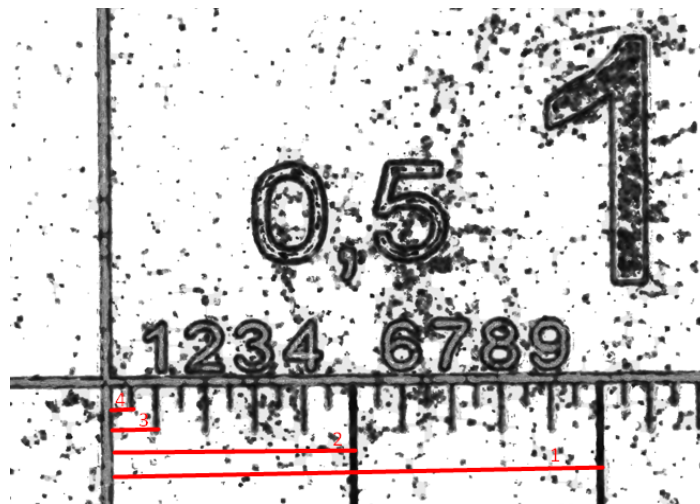
Este ensayo se realiza para ver cuál es la repetibilidad del operario y poder compararla con los resultados de los siguientes ensayos. Si la desviación de los siguientes ensayos es superior a la desviación calculada en estos ensayos se podrá asegurar que se está añadiendo un error adicional al error introducido en la medición por parte del operario.

Para evaluar la repetibilidad del operario se han realizado dos ensayos diferentes, uno en el eje Z, y otro en el eje X ya que la forma de medir no es la misma. En el eje Y no se ha realizado un ensayo específico porque la forma de medir es la misma que en el eje X. Además, también se ha comparado si la repetibilidad de medición por parte del operario es la misma en el eje X e Y que en el eje Z. Para saber cuál ha sido el procedimiento usado para realizar estas medidas se recomienda ir al Anexo III.

Para medir la repetibilidad del operario en ambos ejes se ha realizado una única captura por parte del microscopio por cada una de las diferentes longitudes de medida. Posteriormente, sobre cada una de las imágenes capturadas se han tomado 10 mediciones.

### 3.1.1 Análisis de la repetibilidad del operario en el eje X

En el ensayo se han realizado 10 mediciones sobre el patrón IF-Calibration Tool de cada una de las longitudes de medida de 1 mm, 0,5 mm, 0,1 mm y 0,05 mm. En la figura 5, se muestran de forma visual las zonas medidas en el patrón, que corresponden con la medida 1, 2, 3 y 4 respectivamente.



*Figura 5. Medidas realizadas para evaluar la repetibilidad del operario en el eje X.*

Los valores de upper y lower son los mismos para todas las series de mediciones, ya que no cambia la altura a la que el microscopio realiza la medida. La luminosidad tampoco cambia por el mismo motivo. Todos los parámetros configurados en el microscopio se muestran en la tabla 2.

Brightness	Contrast	Upper	Lower	Vertical Resolution	Lateral resolution
44,3	1	10,464	10,412	340 nm	3,90 $\mu\text{m}$

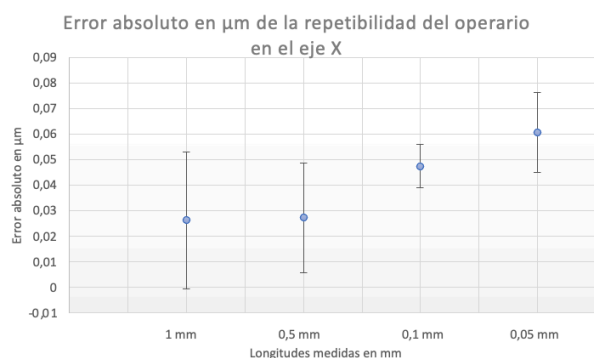
Tabla 2. Parámetros utilizados en la medición de la repetibilidad del operario en el eje X.

En la tabla 3 se muestran la media, desviación estándar y el máximo y mínimo de cada una de las series de medición.

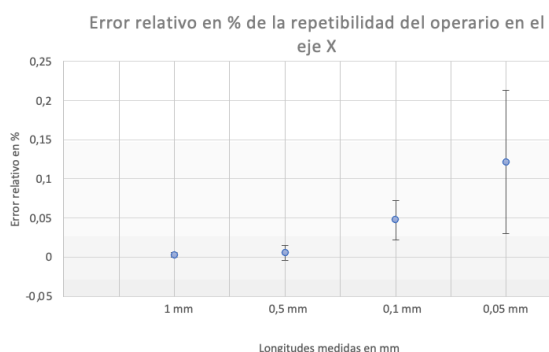
Medidas	Media ( $\mu\text{m}$ )	Desviación ( $\mu\text{m}$ )	Max ( $\mu\text{m}$ )	Min ( $\mu\text{m}$ )
1 mm	997,134	0,0546	997,240	997,061
0,5 mm	498,050	0,0746	498,149	497,894
0,1 mm	99,990	0,0599	100,037	99,865
0,05 mm	50,023	0,0896	50,189	49,894

Tabla 3. Resultados de las mediciones en el eje X de la repetibilidad del operario.

Se observa como la desviación calculada es siempre de la misma magnitud, teniendo una mayor desviación para el valor más pequeño de medir. Para observar estos resultados de forma más precisa se han calculado los errores absolutos y relativos en las siguientes gráficas:



Gráfica 1. Error absoluto de las mediciones para evaluar la repetibilidad del operario en el eje X.



Gráfica 2. Error relativo de las mediciones para evaluar la repetibilidad del operario en el eje X.

La media de las diferentes medidas se muestra con un punto y los extremos de las barras se corresponden con el valor del error máximo y mínimo del parámetro analizado en cada gráfica.

En estas gráficas se observa como el error absoluto es bastante parecido y se mantiene estable para todas las medidas, en cambio, en la gráfica que representa el error relativo, se ve como el valor más pequeño se encuentra para la medida de 1 mm y va creciendo conforme se miden valores más pequeños. Esto se debe a que el operario, mide de píxel en píxel y cada píxel mide 0,998  $\mu\text{m}$ , por lo que cuando la medida sea más pequeña, el error relativo será mayor ya que la diferencia de medir un píxel más o un píxel menos tiene un mayor impacto. Este fenómeno también ocurrirá en todos los cálculos de errores relativos calculados en el eje X e Y.

### 3.1.2 Análisis de la repetibilidad del operario en el eje Z

En el ensayo se han realizado 10 mediciones de cada uno de los escalones del patrón IF-Verification Tool. Estos escalones son de 0,5 mm, 1 mm, 2 mm y 5 mm. En la figura 6, se muestran estos escalones que corresponden con la medida 1, 2, 3 y 4 respectivamente.



Figura 6. Escalones del patrón IF-Verification Tool a medir en la repetibilidad del operario en el eje Z.

Los valores de upper y lower no son los mismos para todas las series de mediciones, ya que cambia el lower al ir cambiando la profundidad del escalón. La luminosidad también cambia por el mismo motivo. Estos valores se muestran en la tabla 4.

Medidas	Brightness	Contrast	Upper (mm)	Lower (mm)	Vertical Resolution	Lateral Resolution
5 mm	2,76	1	21,5217	16,230	250 nm	3,90 $\mu$ m
2 mm	2,07	1	21,5217	19,345	250 nm	3,90 $\mu$ m
1 mm	2,3	1	21,5217	19,998	250 nm	3,90 $\mu$ m
0,5 mm	2,84	1	21,5217	20,791	340nm	3,90 $\mu$ m

Tabla 4. Parámetros utilizados en la medición de la repetibilidad del operario en el eje Z.

En la tabla 5 se muestran los resultados obtenidos en el ensayo:

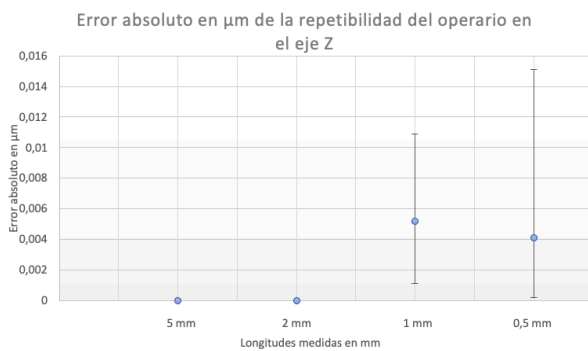
Medidas	Media ( $\mu$ m)	Desviación ( $\mu$ m)	Max ( $\mu$ m)	Min ( $\mu$ m)	Valor fabricante ( $\mu$ m)
5 mm	5003	0	5003	5003	4999,9
2 mm	1999	0	1999	1999	2000,1
1 mm	999,865	0,0079	999,876	999,854	1000,2
0,5 mm	500,343	0,0092	500,358	500,330	500,5

Tabla 5. Resultados de las mediciones en el eje Z de la repetibilidad del operario.

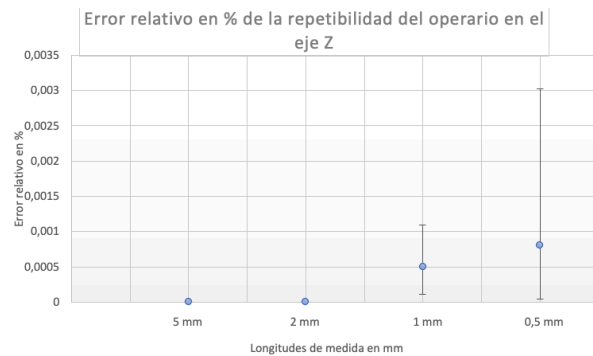
Analizando estos resultados, la media está en todos sus valores un poco por debajo del valor que proporciona el fabricante. La desviación estándar de todos los valores se encuentra en la misma magnitud, por lo que se puede afirmar que el operario no aporta un error adicional

al medir diferentes escalones. Además, la desviación estándar es alrededor de 10 veces menor que la desviación obtenida en el ensayo de repetibilidad del operario en el eje X por lo que se puede afirmar que en el eje Z el error de medición introducido por el operario es menor que en el eje X.

Para obtener más información se han calculado las gráficas de error absoluto, mostrada en la gráfica 3, y la del error relativo, en la gráfica 4.



*Gráfica 3. Error absoluto de las mediciones para evaluar la repetibilidad del operario en el eje Z.*



*Gráfica 4. Error relativo de las mediciones para evaluar la repetibilidad del operario en el eje Z.*

Al ver la gráfica en la que se muestran los errores absolutos, se observa que para las series de medición de 5 mm y 2 mm la dispersión es nula. Esto se debe a que el programa que calcula las mediciones redondea por defecto al micrómetro para estas series de medida. Esto no quiere decir que las medidas en estos escalones sean exactamente las mismas, si no que al redondearlas al micrómetro obtienen el mismo valor, por eso la desviación es nula. En cambio, para las medidas series de medida de 1 mm y 0,5 mm el redondeo que realiza el programa es a la milésima del micrómetro por lo que hay una mayor precisión en la medida y el cálculo de los errores absolutos y relativos son distintos de 0. Por otro lado, el error relativo obtenido en el eje Z sigue la misma tendencia que el error relativo calculado en el eje X ya que cuanto más pequeña sea la medida, mayor será el error relativo, aunque la forma de medir no sea la misma.

## 3.2 Análisis de las medidas de profundidad en el plano Z

En este ensayo se han medido los mismos escalones que se han utilizado para determinar la repetibilidad del operario en el patrón IF-Calibration Tool. La diferencia es que ahora se ha capturado una imagen diferente por cada longitud de medida que se deseaba medir, para comprobar si los resultados obtenidos tienen una desviación mayor que la obtenida en el ensayo en el que se ha evaluado la repetibilidad del operario.

Se han capturado 10 imágenes por cada escalón a medir para tener una muestra significativa de valores para poder estudiar el comportamiento del microscopio. Si los valores no se ajustaban dentro de la incertidumbre dada en el certificado de calibración para el patrón IF-Calibration Tool se ha desestimado la medición.

Los parámetros de medición utilizados son los siguientes:

Medidas	Brightness	Contrast	Upper (mm)	Lower (mm)	Vertical Resolution	Lateral Resolution
5 mm	2,76	1	21,5217	16,230	250 nm	3,90 $\mu\text{m}$
2 mm	2,07	1	21,5217	19,345	250 nm	3,90 $\mu\text{m}$
1 mm	2,3	1	21,5217	19,998	250 nm	3,90 $\mu\text{m}$
0,5 mm	2,84	1	21,5217	20,791	340nm	3,90 $\mu\text{m}$

Tabla 6. Parámetros utilizados en las mediciones del eje Z.

Tras haber explicado cómo han sido tomadas las medidas y cuáles han sido los parámetros de medición se procede a exponer los resultados.

	Media ( $\mu\text{m}$ )	Desviación ( $\mu\text{m}$ )	Max ( $\mu\text{m}$ )	Min ( $\mu\text{m}$ )	Valor fabricante ( $\mu\text{m}$ )
5 mm	5000,0	0	5000,0	5000,0	4999,9
2 mm	2000,0	0	2000,0	2000,0	2000,1
1 mm	999,930	0,0686	1000,001	999,835	1000,2
0,5 mm	500,243	0,0821	500,368	500,123	500,5

Tabla 7. Resultados de las mediciones en el eje Z.

Como se muestra en la tabla 7, todos los valores se encuentran dentro del rango de incertidumbres proporcionadas por el fabricante, que comprende desde + 0,4  $\mu\text{m}$  hasta - 0,4  $\mu\text{m}$ . En las dos primeras mediciones, la desviación es 0, y los valores de media, máximo y mínimo son los mismos por el redondeo que tiene el programa de medición por defecto comentado al evaluar la repetibilidad del operario en el eje Z.

Si se comparan las series de mediciones en las que la desviación es distinta de cero de la tabla 6 con las desviaciones obtenidas en el ensayo de repetibilidad del operario en el eje Z recogidas en la tabla 4 se ve como las desviaciones del último ensayo son de una magnitud mayor. Este error adicional se debe a que no se está midiendo todo el rato sobre la misma imagen, es decir, al medir la misma longitud de medida sobre diferentes capturas de imágenes se introduce una incertidumbre de medición casi 10 veces mayor a la del operario por lo que la repetibilidad del microscopio en el eje Z induce un error importante a la hora de medir.

### 3.3 Análisis de las medidas de longitud en el plano XY

Para estudiar los errores de las medidas del plano XY se ha utilizado el bloque IF-Calibration Tool y sobre él se han realizado tres ensayos diferentes. En primer lugar, se han tomado en eje X 4 series de medida cuyas longitudes de medida son de 1 mm, 0,5 mm, 0,1 mm y 0,05 mm sobre diferentes imágenes. Para tener un valor significativo de resultados por cada serie de medida se ha repetido 10 veces el proceso. En segundo lugar, se ha repetido este mismo proceso para el eje Y, y por último se han repetido estas mediciones, pero solo para las series con los ángulos de 45 ° y de 135 ° sobre la medida de 1 mm.

Los dos primeros ensayos se han realizado para comprobar la repetibilidad en la medida por parte del microscopio comparándose con la repetibilidad del operario en el eje X y entre los ejes X e Y. El tercer ensayo se ha realizado para ver si al orientar el patrón en diferentes direcciones el microscopio tiene una desviación diferente.

Para todos los ensayos siguientes en los que se ha usado el patrón IF-Calibration Tool se han usado los parámetros de medición recomendados por el fabricante y que se muestran en la tabla 8:

Brightness	Contrast	Upper (mm)	Lower (mm)	Vertical Resolution	Lateral resolution
44,3	1	10,464	10,412	340 nm	3,90 $\mu\text{m}$

Tabla 8. Parámetros utilizados en las mediciones del eje X e Y.

#### 3.3.1 Análisis de las medidas tomadas en el eje X

Las mediciones realizadas en el eje X son las mismas que se muestran en la figura 5, y han seguido el mismo procedimiento de medición explicado en el Anexo III.

Los resultados obtenidos en el eje X son los que se muestran en la siguiente tabla:

MEDIDAS X	Media ( $\mu\text{m}$ )	Desviación ( $\mu\text{m}$ )	Max ( $\mu\text{m}$ )	Min ( $\mu\text{m}$ )
1 mm	1000,080	0,0367	1000,135	1000,035
0,5 mm	500,075	0,0689	500,195	499,991
0,1 mm	99,873	0,0717	99,959	99,714
0,05 mm	49,934	0,0420	50,004	49,855

Tabla 9. Resultados de las mediciones en el eje X.

De los resultados mostrados en la tabla 8, se observa como la desviación es similar en todos los casos por lo que no hay un error de medición por parte del microscopio diferente para una de estas longitudes de medida. Además, si se comparan los resultados de este ensayo con los del ensayo de repetibilidad del operario en el eje X, se observa como la desviación mostrada en la tabla 8 para las diferentes series de mediciones es similar o incluso más baja que la del operario. Esto no quiere decir que al medir la misma longitud sobre diferentes capturas no haya una incertidumbre asociada, si no que esa incertidumbre es menor que la introducida por la repetibilidad del operario.

### 3.3.2 Análisis de las medidas tomadas en el eje Y

Las medidas tomadas en el eje Y son las mismas que para el eje X, aunque cambia la orientación del patrón IF-Calibration Tool. Estas medidas se muestran en la siguiente figura:

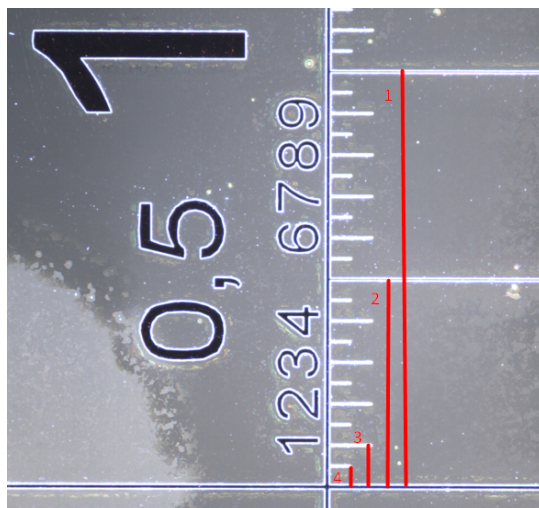


Figura 7. Medidas tomadas en el eje Y.

Los resultados de este ensayo se muestran en la siguiente tabla:

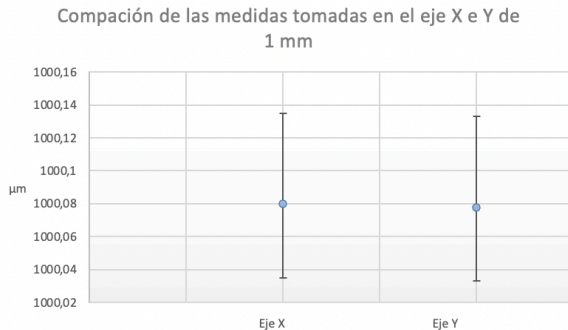
MEDIDAS Y	Media ( $\mu\text{m}$ )	Desviación ( $\mu\text{m}$ )	Max ( $\mu\text{m}$ )	Min ( $\mu\text{m}$ )
1 mm	1000,0780	0,0283	1000,133	1000,033
0,5 mm	500,0960	0,0669	500,193	499,993
0,1 mm	99,855	0,0655	99,962	99,759
0,05 mm	49,944	0,0316	50,004	49,904

Tabla 10. Resultados de las mediciones en el eje Y.

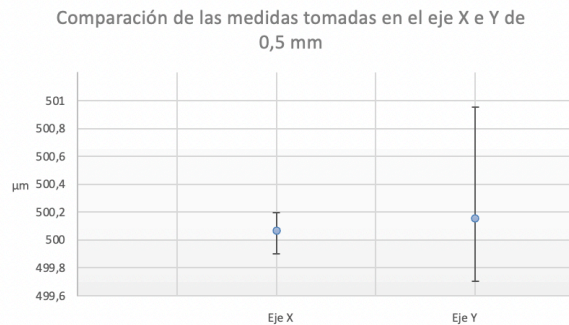
La desviación calculada en las diferentes series de medición es siempre de la misma magnitud por lo que el microscopio no introduce ningún error adicional al medir diferentes longitudes de medida en el eje Y. Además, si se comparan estas desviaciones con las desviaciones de la repetibilidad del operario en el eje X, se ve que ocurre lo mismo que en el eje X, por lo que la incertidumbre introducida por la repetibilidad del operario impide que se pueda evaluar la incertidumbre asociada a este ensayo.

### 3.3.3 Discusión al relacionar las medidas tomadas en el eje X con el eje Y

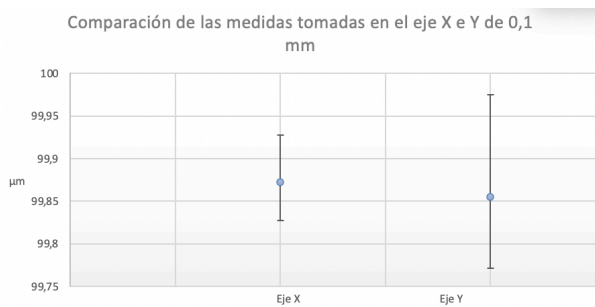
Para poder evaluar si hay una distinción entre medir la misma longitud en el eje X que en el eje Y se han analizado los resultados de los dos ensayos anteriores obteniendo las siguientes gráficas:



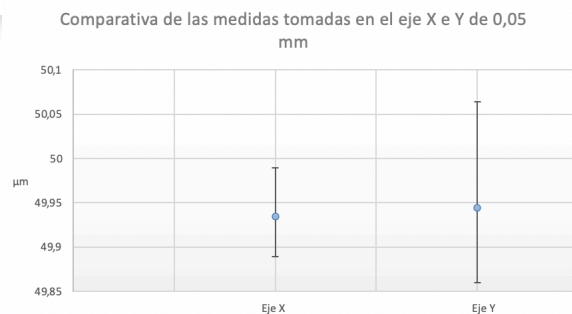
Gráfica 5. Comparativa de la medición  
1 mm entre el eje X e Y



Gráfica 6. Comparativa de la medición  
0,5 mm entre el eje X e Y



Gráfica 7. Comparativa de la medición de  
0,1 mm entre el eje X e Y



Gráfica 8. Comparativa de la medición de  
0,05 mm entre el eje X e Y

Los valores de la media son prácticamente similares en ambos ejes en todas las medidas, en cambio la desviación en algunas graficas parece que es mayor como es el caso de la gráfica 6. En cambio, si se analiza la tabla 11, se ve que en el eje Y se ha cometido un error en la medición al sobrepasar el resultado medio del eje Y en casi 1 micrómetro. Esto se puede achacar a un fallo del operario al realizar la medición.

0,5 mm	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Eje X	500,095	500,145	499,996	500,095	500,045	499,901	500,195	500,131	500,055	500,005
Eje Y	499,703	500,091	500,09	500,192	500,193	500,162	500,042	500,052	500,092	500,953

Tabla 11. Resultados completos de la serie de mediciones de 0,5 mm.

En el resto de las tablas y gráficas hay una fuerte relación entre el valor del eje X y del eje Y por lo que se puede afirmar que el microscopio no tiene ningún error adicional al medir entre estos ejes.

Además, se han realizado otras dos series de mediciones de 1 mm con una inclinación de 45° y 135° para comparar los resultados obtenidos con las series del eje X (0°) e Y (90°). Para realizar esta comparativa se ha elegido el valor de 1 mm porque es el valor que tiene

una desviación estándar menor en ambas series. A continuación, se muestran las imágenes sobre las que se han tomado las mediciones:

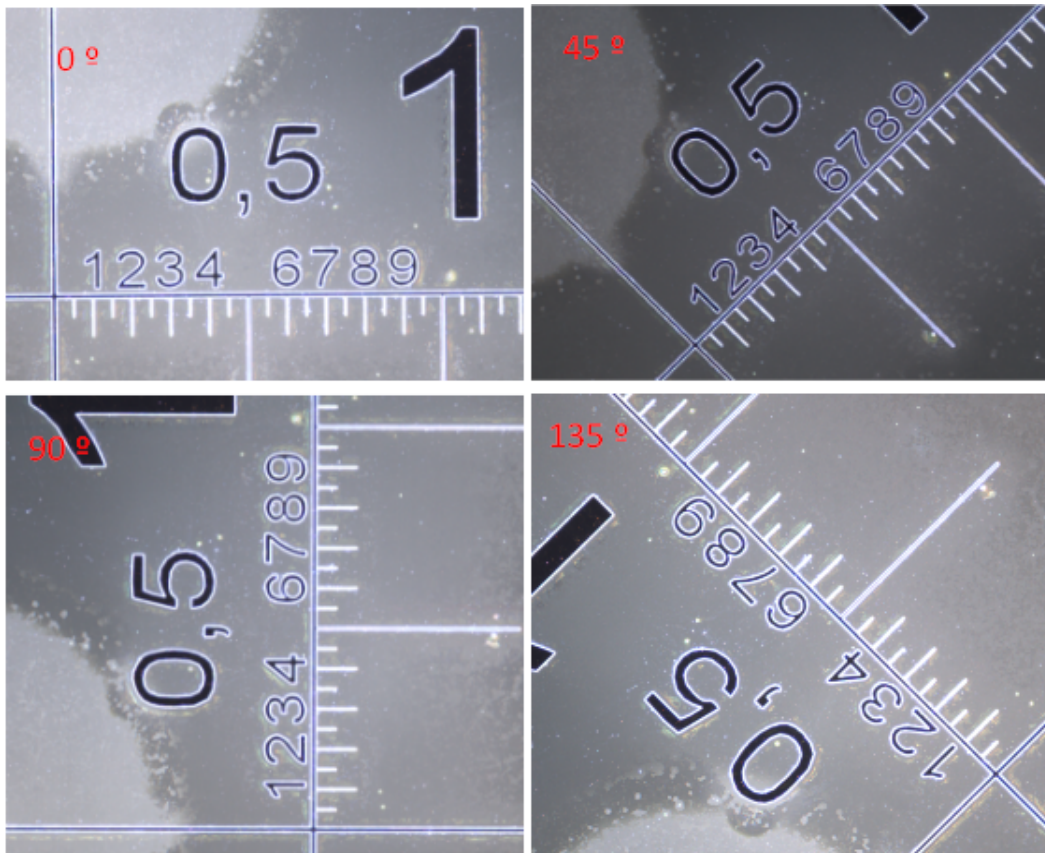


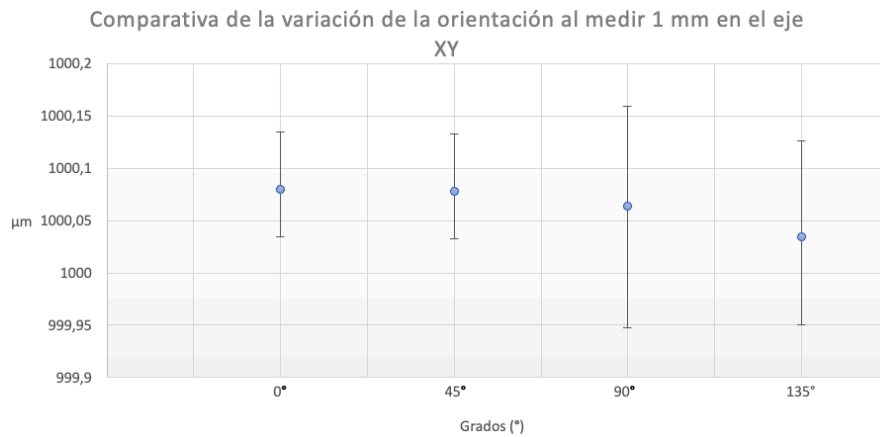
Figura 8. Imágenes sobre las que se han tomado las medidas de 1 mm con diferente orientación.

En la siguiente tabla se muestran la media, la desviación típica y los máximos y mínimos de cada serie respectivamente.

Ángulos	Media ( $\mu\text{m}$ )	Desviación	Max ( $\mu\text{m}$ )	Min ( $\mu\text{m}$ )
0 grados	1000,080	0,0367	1000,135	1000,035
45 grados	1000,078	0,0283	1000,133	1000,033
90 grados	1000,064	0,0682	1000,159	999,948
135 grados	1000,034	0,0476	1000,126	999,95

Tabla 12. Resultados de las mediciones de 1 mm en el eje X con diferente orientación.

Los valores de esta tabla 12 aparecen representados en la gráfica 9 para verlos de forma más visual.



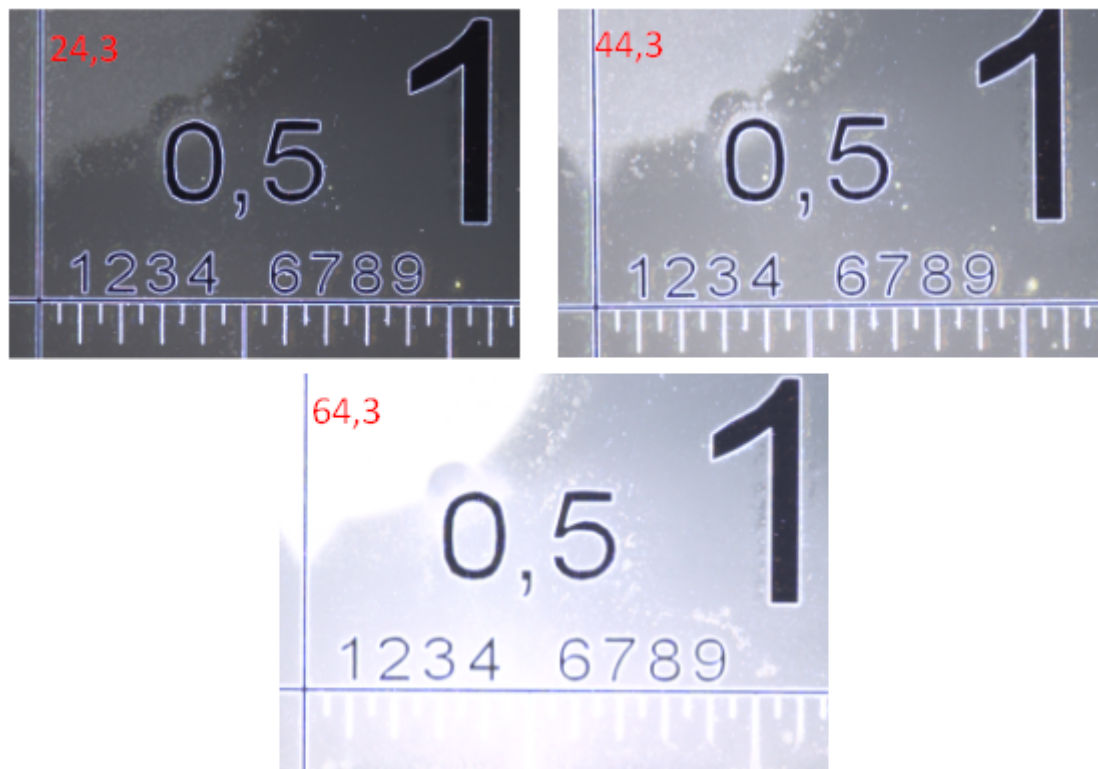
*Gráfica 9. Representación de los resultados de las mediciones de 1 mm en el eje X con diferente orientación.*

Al comparar estos resultados se ve como la media es igual hasta la décima de micrómetro en todos los casos, los valores de máximos y mínimos son prácticamente los mismo y la desviación estándar está por debajo de la incertidumbre de medición del operario por lo que no hay un error adicional al medir en el plano XY con diferente orientación.

### 3.4 Análisis de la variación de la luminosidad

Para este ensayo se ha utilizado el patrón -IF-Calibration Tool y se ha vuelto a medir 1 mm. La finalidad del ensayo consiste en evaluar cómo afecta el cambio de luminosidad en la medición por parte del microscopio. Los valores del parámetro de luminosidad calculado por el microscopio como el más correcto es de 44,3 ya que es el que se obtiene tras ajustar automáticamente este parámetro. Se han realizado 5 ensayos para ver cuál es el resultado de la variación de la luminosidad empezando por un valor de 24,3 y aumentando dicho valor de 10 en 10 hasta llegar a 64,3.

A continuación, se muestran tres imágenes para ver cuál es el comportamiento de aplicar más o menos luminosidad a la hora de ver el patrón IF-Calibration Tool.



*Figura 9. Resultados en la imagen capturada al cambiar el parámetro de la luminosidad.*

Cuanto menor es la luminosidad, aparece una mayor cantidad de píxeles negros, por lo que la línea que delimita donde empieza y donde acaba la medida se hace más estrecha, y cuando se aplica una luminosidad más alta, esta línea se vuelve más gruesa.

A continuación, se muestra una tabla resumen de los parámetros del microscopio para cada una de las series de mediciones.

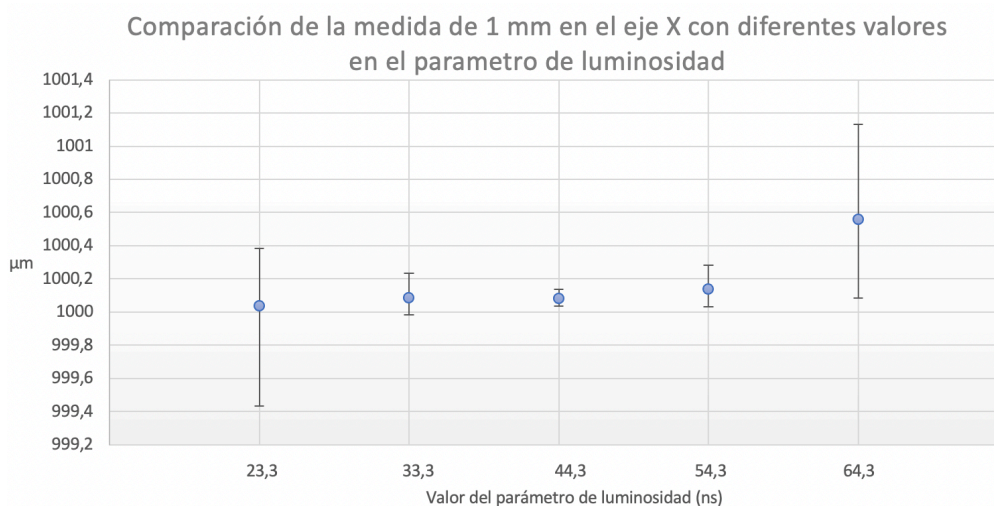
Brightness	Contrast	Upper (mm)	Lower (mm)	Vertical Resolution	Lateral resolution
24,3	1	10,464	10,412	340 nm	3,90 $\mu\text{m}$
34,3	1	10,464	10,412	340 nm	3,90 $\mu\text{m}$
44,3	1	10,464	10,412	340 nm	3,90 $\mu\text{m}$
54,3	1	10,464	10,412	340 nm	3,90 $\mu\text{m}$
64,3	1	10,464	10,412	340 nm	3,90 $\mu\text{m}$

Tabla 13. Parámetros utilizados en las mediciones del eje X cambiando la luminosidad.

Los resultados obtenidos se muestran en la tabla 14 y en la gráfica 10:

Luminosidad	Media ( $\mu\text{m}$ )	Desviación	Max ( $\mu\text{m}$ )	Min ( $\mu\text{m}$ )
23,3	1000,037	0,2603	1000,383	999,435
33,3	1000,083	0,0664	1000,232	999,983
43,3	1000,080	0,0367	1000,135	1000,035
53,3	1000,138	0,0926	1000,283	1000,033
63,3	1000,557	0,4248	1001,131	1000,083

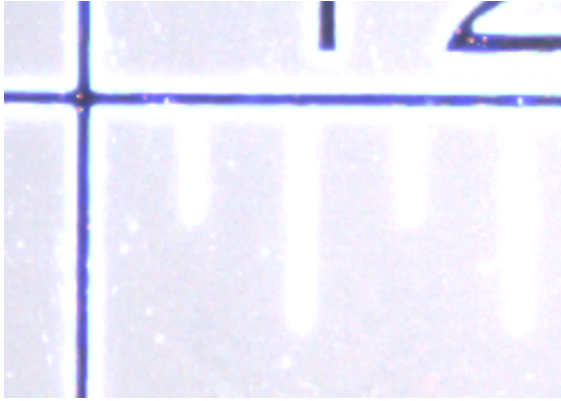
Tabla 14. Resultados de las mediciones de 1 mm en el eje X para las diferentes luminosidades.



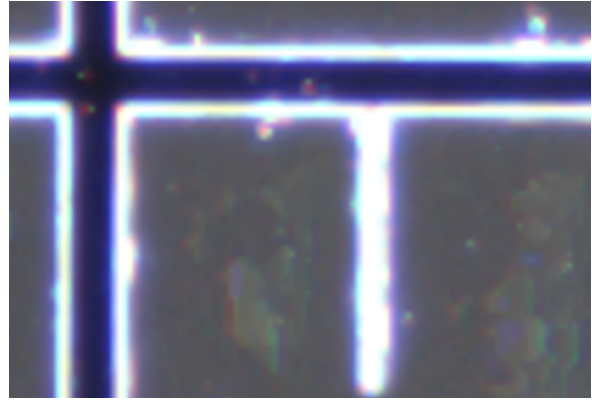
Gráfica 10. Representación de los resultados de las mediciones de 1 mm en el eje X con diferente luminosidad.

El parámetro de luminosidad que recomendaba utilizar el microscopio, el de 43,3, se ve que es el valor que tiene una desviación menor que el resto de las otras series. Al aumentar o disminuir este valor en 10 unidades, la media es similar, pero empieza a verse como los valores están más distribuidos aumentando tanto los valores máximos como los mínimos. Si aumentamos la luminosidad a 63,3 la media crece rápidamente, y la distribución de sus valores también. Esto sucede porque al aumentar tanto la luminosidad, la cantidad de píxeles blancos comienza a ser claramente mayor y, por tanto, el grosor de la línea aumenta y hace que la longitud de la medida sea mayor, como se muestra en la figura 11.

En cambio, cuando disminuimos la luminosidad, el grosor de la línea que marca el principio y el final de la medición baja, pero sigue aumentando la dispersión de los valores. Esto se debe a la variación de la luminosidad, cuanto menor luminosidad hay, menos píxeles blancos y el grosor de la línea de medida disminuye, disminuyendo así el valor de su longitud. Este efecto se muestra en la figura 12.



*Figura 10. Imagen con 64,3 ns de luminosidad.*



*Figura 11. Imagen con 24,3 ns de luminosidad.*

### 3.5 Análisis sobre la variación de altura (eje z)

Para realizar el siguiente ensayo se ha utilizado el patrón IF-Calibration Tool y se ha tomado como altura inicial o cero la propia de la serie de mediciones de 1 mm en el eje X (Figura 13). La finalidad de este ensayo es comprobar si el microscopio tiene algún error adicional en la medición de una misma longitud al variar la altura de medición, siempre dentro del rango de medición del microscopio que se puede ajustar de forma manual, que es de 13 cm de altura. La variación de alturas siempre se ha ido incrementando, tomando la primera serie de medidas a 5,76 mm de altura (Figura 14), la segunda a 9,70 mm (Figura 15) y la tercera a 12,345 mm (Figura 16).



Figura 12. Altura base o cero.

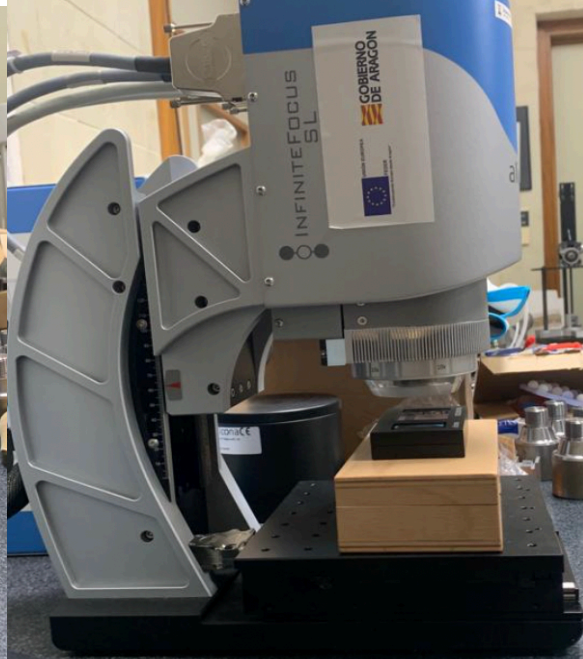


Figura 13. 5,76 milímetros de altura.

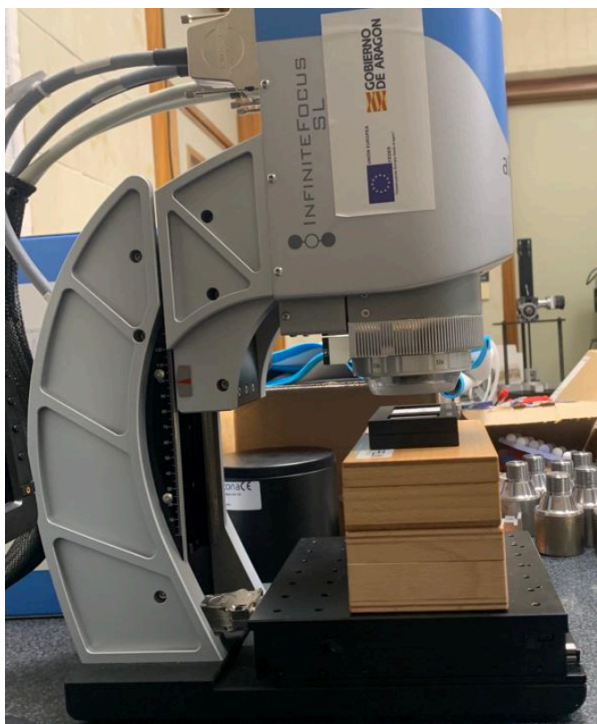


Figura 14. 9,70 milímetros de altura.

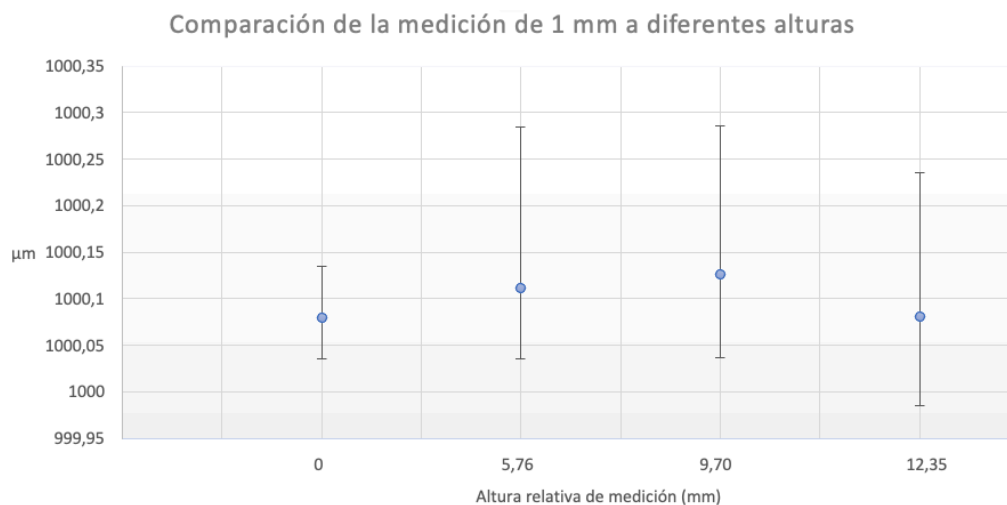


Figura 15. 12,35 milímetros de altura.

Los parámetros a configurar en el microscopio son los mismos que los usados en el ensayo de repetibilidad del operario en el eje X. A continuación, se muestra la tabla 15 que contiene la media, desviación típica, y los máximos y mínimos de los resultados del ensayo y todos ellos representados en la gráfica 11:

Altura relativa	Media ( $\mu\text{m}$ )	Desviación ( $\mu\text{m}$ )	Max ( $\mu\text{m}$ )	Min ( $\mu\text{m}$ )
0 mm	1000,080	0,0367	1000,135	1000,035
5,76 mm	1000,112	0,0713	1000,284	1000,035
9,70 mm	1000,127	0,0769	1000,286	1000,037
12,35 mm	1000,081	0,0867	1000,235	999,985

Tabla 15. Resultados de las mediciones de 1 mm en el eje X para las diferentes alturas.



Gráfica 11. Representación de los resultados de la medición de 1 mm en el eje X a varias alturas.

Al ver la gráfica, se ve como los valores de la media de resultados son bastante similares, con una diferencia máxima de 0,172 micrómetros al medir a 5,76 mm de altura. Si se compara la desviación obtenida en este ensayo con la desviación obtenida en el ensayo que se ha evaluado la repetibilidad del operario en el eje X se ve que son de un valor similar.

Por otro lado, al evaluar la diferencia entre los valores máximos y mínimos, se ve como esta aumenta prácticamente al doble cuando la altura es distinta de la altura base y muestra una progresión ligeramente ascendente, mayor también que en el ensayo anteriormente mencionado. Esto se achaca a que al variar la altura de medición el microscopio proporciona medidas con variación ligeramente mayor, especialmente hacia valores más altos ya que cuanto más alejado está el microscopio en el eje Z, más notables se hacen los errores de alineación del eje Z con la base del microscopio.

### 3.6 Análisis de la variación de las mediciones cuando se realiza un cambio de lente

Para el siguiente ensayo se ha utilizado el patrón IF-Verification Tool y se ha comparado la serie de mediciones del escalón de 1 mm en el eje Z con una nueva serie de 10 mediciones. Este ensayo se ha realizado para comprobar si al cambio de lente introduce un error en la medición. En esta nueva serie se ha vuelto a medir dicho escalón, pero esta vez, se ha cambiado la lente entre cada una de las medidas. Para realizar un cambio de lente de forma segura, en primer lugar, hay que apagar el microscopio, quitar el patrón que se estaba midiendo y subir la lente hasta una altura accesible y cómoda para proceder a desenroscar la lente como se muestra en la figura 16. Posteriormente, se procede a desenroscar la lente con mucho cuidado, ya que es frágil y puede dañarse con facilidad. Una vez se ha quitado la lente, se procede a su colocación, enroscándola de nuevo como se muestra en la figura 17. Cuando se ha terminado de enroscar la lente, se coloca el patrón IF-Verification Tool, se ajusta la altura y se enciende el microscopio para realizar las medidas necesarias.



Figura 16. Enroscado y desenroscado de la lente.

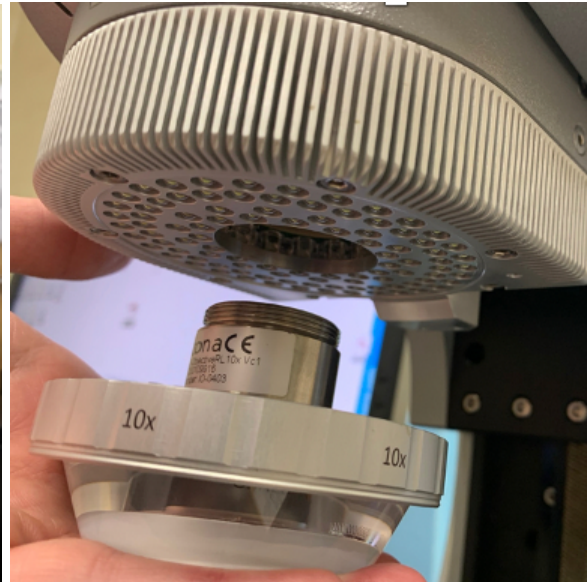


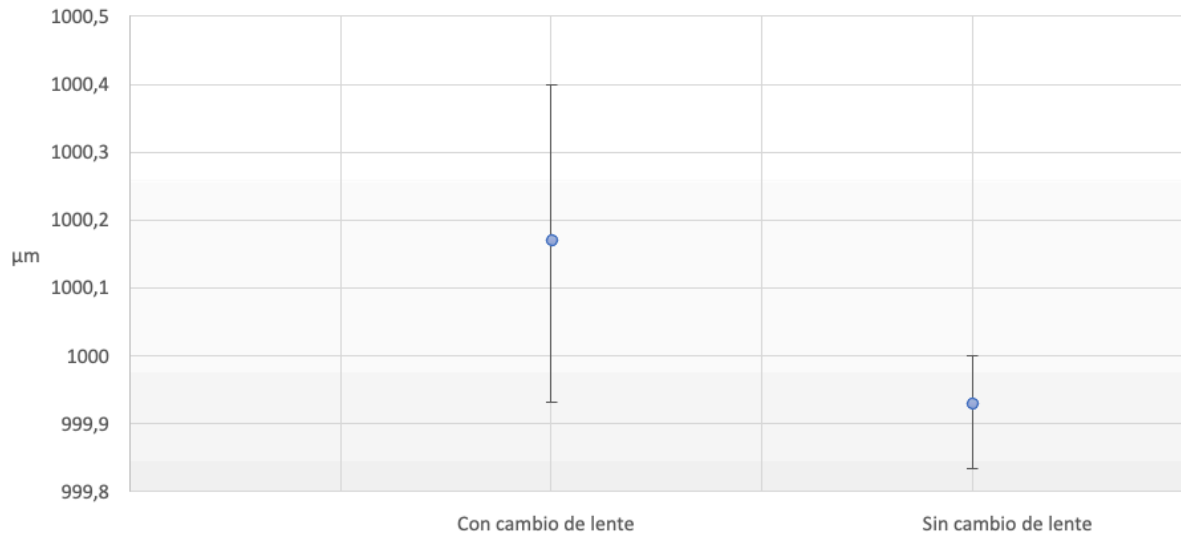
Figura 17. Lente desenroscada del orificio del microscopio.

Los valores de los parámetros a configurar en el microscopio son los mismos que en el ensayo de repetibilidad del operario en el eje Z para el escalón de 1 mm. Los resultados del ensayo se muestran a continuación en la tabla 16 y el gráfico 17 donde se representan los valores de dicha tabla:

Cambio de lente	Media ( $\mu\text{m}$ )	Desviación	Max ( $\mu\text{m}$ )	Min ( $\mu\text{m}$ )
Con cambio de lente	1000,183	0,1331	1000,4	999,931
Sin cambio de lente	999,930	0,0686	1000	999,835

Tabla 16. Resultados de las mediciones del escalón de 1 mm con cambio de lente y sin cambio de lente.

### Comparación de la medición de un 1 mm con cambio de lente o sin cambio de lente en el eje Z



Gráfica 12. Representación de los resultados obtenidos en las mediciones del escalón de 1 mm con cambio de lente y sin cambio de lente.

En primer lugar, se pone el foco sobre la media de ambas mediciones, ya que el valor de la medición en la calibración por el fabricante del patrón IF-Verificación Tool para el escalón de 1 mm es de  $1000,2 \pm 0,4$  micrómetros, y ambos valores se encuentran dentro del rango de tolerancias. Además, los valores máximos y mínimos de la serie de medición también se encuentran también dentro de este rango.

Por otro lado, si se compara la desviación obtenida en la serie de mediciones en la que se cambia la lente con la desviación obtenida en el ensayo en el que se mide la repetibilidad del operario en el eje Z, se ve como la desviación de este ensayo es casi 1,7 veces mayor. Por este motivo, se puede decir que el cambio de lente aumenta el error en la medición. Esto se puede deber a que, al cambiar de lente es imposible volverla a colocar en la misma posición en la que se encontraba para la medida anterior. Además, con estos cambios, la superficie de la lente puede ensuciarse ligeramente y hacer que cambie también el valor recomendado de luminosidad.

### 3.7 Análisis sobre la unión de dos imágenes y su influencia en la medida.

Para el siguiente ensayo se ha vuelto a utilizar el patrón IF-Calibration Tool y se ha comparado la serie de mediciones de 1 mm y 0,5 mm en el eje X con dos nuevas series de 10 mediciones. En estas nuevas series se han medido 1 mm y 0,5 mm en el eje X, pero esta vez, uniendo dos imágenes diferentes para comprobar si cuando se unen se ve afectada la longitud a medir como se ha explicado en el Anexo III. A continuación, se muestra la imagen sobre la que se han tomado las medidas (Figura 18), una imagen mucho más grande que las anteriores ya que ahora, la imagen muestra una superficie mayor que la de 2 mm × 2 mm.

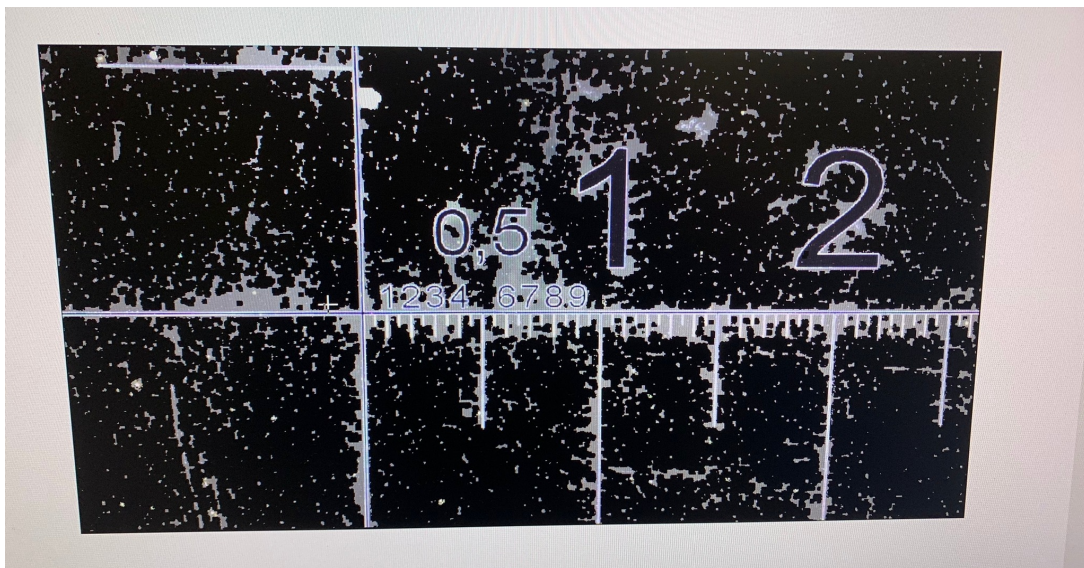
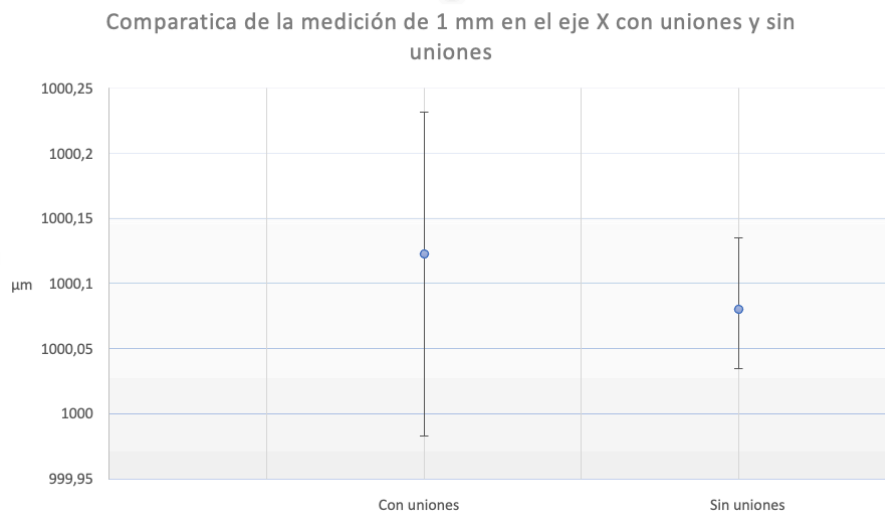


Figura 18. Imagen sobre las que se realizan las medidas al unir dos capturas de imagen.

Los parámetros de medición del MVF son los mismos que en la tabla 4. Los resultados del ensayo se muestran a continuación en la tabla 17 para las mediciones de 1 mm y en la tabla 18 para las de 0,5 mm. El gráfico 13 representan los resultados de las mediciones de 1 mm y el gráfico 14 los de 0,5 mm

Uniones	Media ( $\mu\text{m}$ )	Desviación ( $\mu\text{m}$ )	Max ( $\mu\text{m}$ )	Min ( $\mu\text{m}$ )
Con uniones	1000,122	0,0934	1000,232	999,983
Sin uniones	1000,080	0,0367	1000,135	1000,035

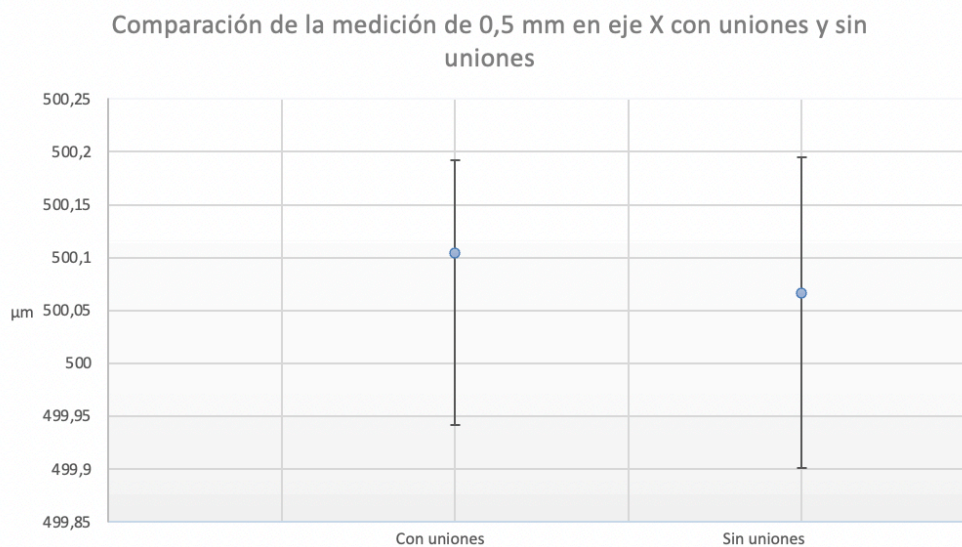
Tabla 17. Resultados de las mediciones de 1 mm en el eje X con uniones y sin uniones.



Gráfica 13. Representación de los resultados de las mediciones de 1 mm en el eje X con uniones y sin uniones.

Uniones	Media (µm)	Desviación	Max (µm)	Min (µm)
Con uniones	500,104	0,0870	500,192	499,942
Sin uniones	500,066	0,0851	500,195	499,901

Tabla 18. Resultados de las mediciones de 0,5 mm en el eje X con uniones y sin uniones.



Gráfica 14. Representación de los resultados de las mediciones de 0,5 mm en el eje X con uniones y sin uniones.

Al evaluar los resultados de este ensayo, se ve como en ambos casos la media crece entorno a 0,4 micrómetros. Esto se debe a que el programa del microscopio encargado de realizar las uniones o costuras de las capturas de las dos imágenes diferentes tiene problemas al unirlos y añade este error en las mediciones.

Por otro lado, al compararse la desviación de estos resultados con la desviación obtenida en el ensayo de repetibilidad del operario en el eje X, se observa que son unos valores similares, por lo que se puede concluir conque al unir dos imágenes no se aumenta su desviación, pero si el valor medio de este.

## 4.Recomendaciones

En este punto se van a resumir los resultados de los ensayos en recomendaciones para mejorar el uso del microscopio InfiniteFocusSL que se encuentra en el departamento de Ingeniería de Diseño y Fabricación en la Universidad de Zaragoza. Estas recomendaciones se encuentran ordenadas también por la prioridad que el operario debe darles, siendo la mas prioritaria la primera y la menos prioritaria la última.

En primer lugar, medir en el eje Z tiene un error asociado por parte del operario mucho menor que en el eje X e Y ya que la forma de medir es totalmente diferente. En estos dos últimos ejes el operario es el encargado de delimitar tanto el principio como el final de la medición, tarea que puede ser complicada al medir un píxel de más o de menos, sobre todo en la parte final por lo que se recomienda prestar especial atención al realizar mediciones en estos ejes.

En segundo lugar, se recomienda utilizar los valores proporcionados por el fabricante en la descripción técnica del patrón para los diferentes parámetros de medición del microscopio. En este documento no aparece la luminosidad, por lo que se recomienda usar el ajuste automático que proporciona el programa de medición ya que si se utiliza una luminosidad más alta de la requerida el valor de la medición aumentará con respecto al real y si la luminosidad es menor, el valor de la medición disminuirá.

En tercer lugar, no se recomienda utilizar las uniones si no es necesario, ya que al unir 2 imágenes la media es ligeramente superior y su desviación también aumenta. Además, al unir muchas imágenes puede ser que los errores que aparecen ahora se multipliquen y la medida se aleje más del valor real.

En cuarto lugar, se recomienda cambiar de lente las menos veces posibles durante series de medida que posteriormente se quieran comparar ya que introducen un pequeño error en la medida y un aumento en la desviación de los valores.

En quinto lugar, se recomienda que la pieza este apoyada sobre la base del microscopio, es decir, que no se apoye sobre ninguna pieza que pueda elevarla ya que esto hace que los valores en las mediciones tengan una mayor dispersión. Por otro lado, cabe recordar que siempre hay que dejar un hueco entre el patrón o la pieza a medir y la lente de unos 17,5 mm.

Por último, el error es similar en cuanto a la orientación del microscopio en el plano XY, por lo que el operario no debe prestar especial atención a la orientación del patrón para medir de una forma u otra.

## 5. Conclusiones

La microscopia de variación focal es la técnica utilizada por el microscopio Infinite FocusSL utilizado en los ensayos realizados. Esta técnica permite proporcionar información topográfica y de color gracias a la variación de enfoque. Al realizar la medición de una superficie completa, la óptica del microscopio se mueve a lo largo del eje óptico (eje Z) para garantizar que cada región del espécimen esta correctamente enfocada.

Los parámetros más importantes a la hora de configurar el microscopio son la luminosidad o brillo, el contraste, la resolución vertical y la resolución horizontal.

Una vez entendido que es la microscopia de variación de enfoque y cuáles son los parámetros que hay que configurar en un microscopio de este tipo se han realizado diversos ensayos en los que se ha analizado la repetibilidad del operario tanto en el eje X como en el eje Z (en el eje Y no ya que la forma de medir es la misma que en el eje X). Los resultados de este análisis se han comparado con los ensayos obtenidos en el ensayo de repetibilidad del microscopio en los tres ejes de medición, así como la orientación del patrón en el plano XY. También se ha analizado cual es la incidencia en la medida al cambiar la luminosidad del microscopio, la altura de medición o el cambio de lente. Por último, también se ha analizado que ocurre cuando el microscopio une dos imágenes y hay que realizar una medición sobre la que se encuentra la zona 'unida' o 'cosida'. De estos ensayos se han extraído las siguientes conclusiones.

- La repetibilidad del operario en el eje X e Y influye casi 10 veces más que en el eje Z. Esto se debe a que los procedimientos de medida en el eje Z son mucho más sencillos que en el eje X o Y.
- Al evaluar la repetibilidad del microscopio se debe tener en cuenta el valor de la repetibilidad del operario. Los errores obtenidos en el ensayo de repetibilidad del microscopio son similares a los errores obtenidos en el ensayo de repetibilidad del operario por lo que la repetibilidad del microscopio es prácticamente despreciable en comparación con la repetibilidad del operario.
- Cuando la luminosidad o brillo no están bien ajustadas, empeora la precisión de la medida. Si la luminosidad es mayor a la necesaria, el valor medio de las mediciones será mayor que el real, y si la luminosidad es más baja, el valor medio será menor.
- Al aumentar la altura de medición, la dispersión en las medidas aumenta. Esto se podría deber a que cuanto más alto este el microscopio la proyección del error de inclinación del eje Z con respecto a la base del microscopio es mayor.
- Ante un cambio de lente, el valor de la medida cambia, ya que es imposible colocar la lente en la misma posición.
- Al unir 2 imágenes, se comete cierto error ya que esta unión o cosido no es perfecto. Si se mide una longitud que se encuentra entre el 'cosido' de las imágenes el error de la medición aumentara.

## 6. Bibliografía

- [1] JCCM200, Vocabulario Internacional de Metrología, Conceptos fundamentales y generales, y términos asociados, 2012.
- [2] A. I. Alburayt, in *Calibration of focus variation microscopy for surface texture measurement*, Nottingham, Universidad de Nottingham, 2019, p. 261.
- [3] Y. C. Hernández Rivera, «Evolución tecnológica de instrumentos de medición utilizados en la industria automotriz,» de *Evolución tecnológica de instrumentos de medición utilizados en la industria automotriz*, Universidad de Sonora , 2010.
- [4] «Evident,» [En línea]. Available: <https://www.olympus-ims.com/es/measuring-microscopes-precision-and-high-throughput-in-manufacturing/>. [Último acceso: Enero 2023].
- [5] AENOR, "EN ISO 25178-606:2015," in *Especificación geométrica de productos (GPS). Calidad superficial: Areas. Parte 606: Características nominales de instrumentos sin contacto(con variación focal)*, Madrid, AENOR, 2015.
- [6] Alicona, «Focus Variation, Edition 6,» *Alicona*, p. 86.
- [7] Alicona, «Bruker Alicona,» 2023. [En línea]. Available: <https://www.alicon.com/en/products/infinitefocuss/>. [Último acceso: 04 12 2022].
- [8] U. d. Zaragoza, de *Modelado y análisis de sistemas de medición*, Zaragoza, Univerdidad de Zaragoza.
- [9] J. Pérez Porto y A. Gardey, «Definición.De,» 17 Mayo 2016. [En línea]. Available: <https://definicion.de/brillo/>. [Último acceso: 2023 Enero].
- [10] J. Pérez Porto y M. Merino, «Definición.De,» 15 Noviembre 2010. [En línea]. Available: <https://definicion.de/contraste/>. [Último acceso: Enero 2023].
- [11] Histoptica, «Histoptica, Resolución en microscopios,» [En línea]. Available: <https://histoptica.wordpress.com/resolucion-en-microscopios/>. [Último acceso: Enero 2023].