



**Universidad**  
Zaragoza

## Trabajo Fin de Máster

Análisis del proceso de identificación de porosidades  
mediante tomografía computarizada

Analysis of the porosity identification process using computed  
tomography

**Autor:**

Fernando Gonzalo Ramos Lasala

**Director:**

José Antonio Albajez García

**Codirector:**

Daniel Gallardo Artal

Máster en Ingeniería Industrial

Escuela de Ingeniería y Arquitectura

Universidad de Zaragoza

25/06/2024

## Agradecimientos

Con el presente trabajo pongo el punto final a una importante etapa en mi carrera y en mi vida. No muchos son quienes se adentran en esta aventura, pero aún menos son aquellos que consiguen completar el recorrido. No siempre se es capaz de ver el final, pero si algo he aprendido en estos años es que no importa cuan largo sea el túnel, la certeza de que al otro lado aguarda la salida es lo que nos mueve y siempre nos debe mover a seguir avanzando. Por ello, no puedo estar más que agradecido a todo el mundo que me ha acompañado en esta travesía, a los que están y a los que ya no están, porque estuvieron y siempre estarán.

Agradecer la ayuda y colaboración de mi director y de mi codirector de Trabajo Fin de Máster, José Antonio y Daniel, ya que sin ellos este trabajo no hubiera sido posible. Manifiestar mi agradecimiento al departamento de Área de Ingeniería de los Procesos de Fabricación igualmente, a la Universidad de Zaragoza y en concreto a la EINA.

Agradecer a mi familia el apoyo durante estos años. En especial a mis padres Ana y Gonzalo, a mi hermano Sergio, y a mi abuela Manuela. Su ayuda y su presencia en el trayecto han sido fundamentales. Gracias también a mi pareja Paula por caminar junto a mí en el camino.

Expresar mi gratitud también a mis amigos, a los que traía de antes y a los que he conocido en la universidad. A todos ellos gracias por crecer conmigo.



Fernando Ramos Lasala

Zaragoza, 25 de junio de 2024

## Resumen

Los defectos internos tales como inclusiones, poros e incluso grietas pueden limitar enormemente las prestaciones mecánicas esperadas de cualquier producto. En la actualidad la tomografía computarizada (XCT) está acaparando una gran atención debido a su capacidad para evaluar el interior de una pieza de manera no destructiva. Sin embargo, dado que es una tecnología relativamente reciente en el ámbito industrial, existen claras limitaciones. Una forma de abordar el problema consiste en diseñar piezas de “referencia”. Este Trabajo Fin de Máster pretende analizar la capacidad de detección de porosidad del nuevo sistema de tomografía Metrotom 800 225 kV de UNIZAR. En primer lugar, se lleva a cabo el diseño y fabricación de una pieza de referencia con porosidad artificial, y se procede con el análisis de los defectos. En segundo lugar, se incluye una experimentación de detección de los poros con software especializado. En tercer lugar, se realizan diferentes tomografías del mismo defecto, variando parámetros clave entre ellas, para detectar posibles variaciones en los resultados. Por último, se establecerán una serie de conclusiones y se abrirán nuevas líneas de investigación sobre el tema.

## Abstract

Internal defects such as inclusions, pores, and even cracks can greatly limit the expected mechanical performance of any product. Currently, computed tomography (XCT) is gaining significant attention due to its ability to non-destructively evaluate the interior of a piece. However, since it is a relatively recent technology in the industrial field, there are clear limitations. One way to address this problem is by designing "reference" pieces. This Master's Thesis aims to analyze the porosity detection capability of the new Metrotom 800 225 kV tomography system from UNIZAR. Firstly, the design and manufacture of a reference piece with artificial porosity is carried out, followed by defect analysis. Secondly, an experiment to detect the pores using specialized software is included. Thirdly, different tomographies of the same defect are performed, varying key parameters among them to detect possible variations in the results. Finally, a series of conclusions will be established, and new lines of research on the subject will be opened.

# Índice de contenidos

1. Introducción .....	1
1.1. Estado del arte de la tecnología.....	1
1.1.1. Historia.....	1
1.1.2. Comparación de la CT con otras tecnologías .....	2
1.1.3. Funcionamiento de la tecnología.....	4
1.2. Estado actual de la CT.....	6
1.3. El análisis de la porosidad en la CT .....	8
1.4. Objetivo y alcance del estudio .....	9
2. Diseño del patrón .....	10
2.1. Máquinas e instrumentación.....	10
2.1.1. Objet Eden 350V.....	10
2.1.2. Zeiss Metrotom 800 225 kv .....	10
2.1.3. Alicona InfiniteFocusSL .....	11
2.2. Pieza patrón.....	13
3. Estudio.....	16
3.1. Generación de archivos 3D .....	16
3.2. Inspección de los poros .....	18
4. Resultados .....	21
4.1. Diámetros y alturas de la tomografía frente a referencia .....	21
4.2. Cilindricidad de la tomografía de pines encapsulados frente a abiertos .....	27
5. Estudio complementario de porosidad con software dedicado .....	29
5.1. Módulo de porosidad de VGSTUDIO.....	29
5.2. Módulo de porosidad de Zeiss Inspect X-Ray .....	31
6. Estudio del efecto de los parámetros sobre la capacidad de detección de la tomografía .....	33
6.1. Variación del voltaje.....	33
6.2. Variación del tamaño de vóxel .....	35
7. Conclusiones y trabajo a futuro.....	38
Bibliografía .....	40
ANEXOS.....	41
Anexo A: Proceso de diseño de la pieza patrón .....	42
A.1. Prototipo I.....	42
A.2. Prototipo II .....	44
A.3. Prototipo III.....	47
A.4. Prototipo final.....	53
A.5. Utillaje para microscopio .....	56
Anexo B: Tablas de resultados y gráficos .....	58

B.1. Tablas de datos.....	58
B.2. Gráficos resumen.....	70
Anexo C: Diferencias de procedimiento en el análisis de los datos.....	75
Anexo D: Especificaciones de la maquinaria empleada .....	78

## Índice de figuras

Figura 1: Hitos en el desarrollo de la CT por rayos X.....	1
Figura 2: Werth TomoScape® 200.....	2
Figura 3: Máquina de medir por coordenadas (MMC) en la Universidad de Zaragoza.....	2
Figura 4: Comparación de END según localización de defectos y resolución alcanzable.....	3
Figura 5: Componentes principales de un equipo de tomografía .....	4
Figura 6: Secuencia de imágenes capturadas en CT .....	5
Figura 7: Detalle de vóxeles de una sección de pieza y generación de superficies.....	5
Figura 8: Histograma de tomografía .....	6
Figura 9: Reconstrucción de superficies por métodos táctiles (a y b) y ópticos (c y d).....	7
Figura 10: Artefactos en una radiografía de CT .....	8
Figura 11: PolyJet Eden 350V.....	10
Figura 12: Zeiss Metrotom 800.....	11
Figura 13: Microscopio Alicona.....	11
Figura 14: Limitación caracterización tamaño agujeros en microscopio .....	12
Figura 15: Diseño del patrón de porosidad .....	13
Figura 16: Dimensiones de los componentes del patrón y numeración de los poros.....	14
Figura 17: Patrón de porosidad .....	15
Figura 18: Limpieza del Pin 2, exitosa en el Poro 3 (a) y fallida en los Poros 1 y 2 (b).....	15
Figura 19: Configuración de microscopio Alicona .....	16
Figura 20: Volumen generado por Alicona para el Pin 1.....	16
Figura 21: Configuración de tomógrafo Metrotom 800.....	17
Figura 22: Volumen generado por tomografía del Pin 5 abierto .....	17
Figura 23: Alineación de archivos 3D del microscopio y tomografía para el Pin 3.....	18
Figura 24: Volumen generado por tomografía del Pin 4 encapsulado.....	18
Figura 25: Inspección de poros en volumen de microscopio del Pin 3 .....	19
Figura 26: Inspección del Poro 2 Pin 3 en tomografía con círculo y altura .....	19
Figura 27: Inspección del Poro 10 Pin 6 en tomografía con cilindro .....	20
Figura 28: Poro no pasante (a), poro con irregularidades internas (b) y poro pasante (c) .....	21
Figura 29: Detección irregular del gap por el software.....	21
Figura 30: Altura de los poros según Pin y según método de medida.....	22
Figura 31: Poro pasante en tomografía pero obstruido en microscopio (a) y obstruido a la vista (b).....	23
Figura 32: Gap entre pin y matriz .....	23
Figura 33: Diámetro de los poros según Pin y según método de medida.....	24
Figura 34: Gráfica Pin 3, Ø Microscopio vs Ø Tomografía Pines Encapsulados.....	25
Figura 35: Gráfica Pin 3, Altura Microscopio vs Altura Tomografía Pines Encapsulados .....	25
Figura 36: Pin 6, Ø Microscopio vs Ø Tomografía Pines Encapsulados .....	26
Figura 37: Gráfica Pin 6, Altura Microscopio vs Altura Tomografía Pines Encapsulados .....	26
Figura 38: Desviaciones en la cilindridad de los Pines Encapsulados respecto a los Abiertos	27
Figura 39: Poro aproximado a u cilindro en VGSTUDIO .....	29

Figura 40: Sección del montaje (a) y detección automática de porosidad (b) en VGSTUDIO...	30
Figura 41: Vista 3D de porosidad en VGSTUDIO.....	31
Figura 42: Creación de elemento de defecto de volumen .....	31
Figura 43: Vista 3D de porosidad en Zeiss Inspect X-Ray .....	32
Figura 44: Escala de volumen de poros en Zeiss Inspect X-Ray con tamaño de vóxel 65 $\mu\text{m}$ ...	32
Figura 45: Histogramas de configuración del tomógrafo según voltajes .....	33
Figura 46: Poro 8 del Pin 2 a 50 kv (a), 70 kv (b), 100 kv (c), 130 kv (d), 150 kv (e) .....	34
Figura 47: Gráfica diámetro y cilindridad Zeiss Inspect X-Ray vs VGSTUDIO según voltaje .....	35
Figura 48: Posición de medición en el tomógrafo para tamaño de vóxel de 18 $\mu\text{m}$ (a) y 34 $\mu\text{m}$ (b) .....	36
Figura 49: Poro 8 del Pin 2 con tamaño de vóxel de 18 $\mu\text{m}$ (a), 34 $\mu\text{m}$ (b) y 65 $\mu\text{m}$ (c) .....	36
Figura 50: Gráfica diámetro y cilindridad Zeiss Inspect X-Ray según tamaño de vóxel.....	37
Figura 51: Matriz prototipo I.....	42
Figura 52: Pin prototipo I.....	43
Figura 53: Ensamblaje prototipo I.....	43
Figura 54: Dimensiones del tornillo con tuerca .....	44
Figura 55: Prototipo II Modelo A.....	45
Figura 56: Prototipo II Modelo B.....	45
Figura 57: Detalle pin Modelo B.....	46
Figura 58: Impresiones prototipo II .....	46
Figura 59: Tomografía del prototipo II Modelo B.....	47
Figura 60: Prototipo III .....	48
Figura 61: Detalles de los pines A y B, prototipo III.....	48
Figura 62: Impresiones prototipo III con FFF .....	49
Figura 63: Microscopio Alicona operando.....	50
Figura 64: Archivo STL del prototipo III.....	50
Figura 65: Orificio pequeño saturado.....	51
Figura 66: Interfaz de Metrotom OS durante tomografía.....	51
Figura 67: Sección intermedia de la pieza montada y poro interior.....	52
Figura 68: Inclusión de otro material en la pieza .....	53
Figura 69: Agujeros complementarios, prototipo final .....	53
Figura 70: Detalles de los pines A y B, prototipo final .....	54
Figura 71: Pieza con material de soporte .....	54
Figura 72: Proceso de limpieza .....	55
Figura 73: Impresión de prototipo final con Eden 350V.....	55
Figura 74: Tomografía Prototipo final Pin A.....	56
Figura 75: Utillaje para microscopio.....	56
Figura 76: Impresión del utillaje .....	57
Figura 77: Pieza fijada a la mesa del microscopio .....	57
Figura 78: Diámetro, altura y cilindridad de la Tomografía de los Pines Abiertos .....	70
Figura 79: Diámetro y Altura del Microscopio .....	71
Figura 80: Diámetro, altura y cilindridad de la Tomografía de los Pines Encapsulados .....	72
Figura 81: $\emptyset$ Microscopio vs $\emptyset$ Tomografía Pines Encapsulados.....	73
Figura 82: Altura Microscopio vs Altura Tomografía Pines Encapsulados.....	74
Figura 83: Casos de creación de cilindros en Pines Abiertos.....	75
Figura 84: Gráfica comparación casos (a) y (b) para Pines Abiertos.....	76
Figura 85: Casos de creación de cilindros en Pines Encapsulados .....	76
Figura 86: Gráfica comparación casos (a) y (b) para Pines Encapsulados.....	77

## Índice de tablas

Tabla 1: Propiedades Alicona InfiniteFocusSL según objetivo .....	12
Tabla 2: Dimensiones Zeiss Inspect X-Ray vs VGSTUDIO según voltaje .....	34
Tabla 3: Dimensiones Zeiss Inspect X-Ray según tamaño de vóxel.....	36
Tabla 4: Dimensiones de los poros abiertos Pin 1 .....	58
Tabla 5: Dimensiones de los poros encapsulados Pin 1 .....	59
Tabla 6: Dimensiones de los poros abiertos Pin 2.....	60
Tabla 7: Dimensiones de los poros encapsulados Pin 2 .....	61
Tabla 8: Dimensiones de los poros abiertos Pin 3.....	62
Tabla 9: Dimensiones de los poros encapsulados Pin 3 .....	63
Tabla 10: Dimensiones de los poros abiertos Pin 4.....	64
Tabla 11: Dimensiones de los poros encapsulados Pin 4 .....	65
Tabla 12: Dimensiones de los poros abiertos Pin 5.....	66
Tabla 13: Dimensiones de los poros encapsulados Pin 5 .....	67
Tabla 14: Dimensiones de los poros abiertos Pin 6.....	68
Tabla 15: Dimensiones de los poros encapsulados Pin 6 .....	69

## Índice de abreviaturas

<i>Abreviatura</i>	<i>Significado</i>
<i>CT</i>	Tomografía Computarizada
<i>END</i>	Ensayo no destructivo
<i>MMC</i>	Máquina de medir por coordenadas
<i>AM</i>	Fabricación aditiva

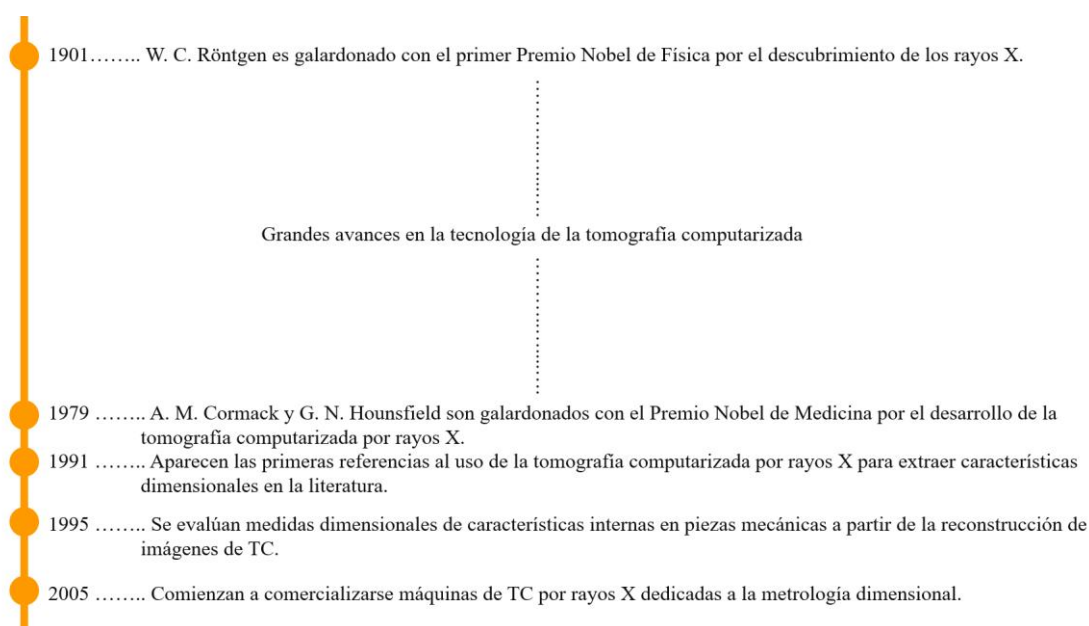
# 1. Introducción

Para dar pie a la presentación del objeto de este trabajo, previamente se presenta el contexto actual de la tomografía computarizada o más comúnmente conocida por sus siglas en inglés CT (*Computed Tomography*).

## 1.1. Estado del arte de la tecnología

### 1.1.1. Historia

La tomografía clásica o laminografía, también conocida como "tomografía convencional", fue concebida durante la primera mitad del siglo XX. Durante la segunda mitad del siglo XX, con nuevos avances en electrónica y la llegada de computadoras modernas, se comenzó a desarrollar la "tomografía computarizada por rayos X". Al principio, a comienzos de la década de 1970, la tomografía computarizada se utilizaba únicamente en el campo médico, pero a principios de la década de 1980 comenzaron a aparecer adaptaciones de la tecnología de CT médica para la evaluación no destructiva en la industria [1].



*Figura 1: Hitos en el desarrollo de la CT por rayos X*

*Fuente: elaboración propia a partir de [1]*

No es hasta 2005 que empiezan a verse los primeros modelos suficientemente precisos de máquinas de CT por rayos X (XCT) para un uso estrictamente metrológico. La primera máquina en comercializarse fue la Werth TomoScope® 200 (primera máquina de medición de coordenadas con tomografía de rayos X y capacidades multisensor opcionales). A día de hoy esta tecnología sigue desarrollándose.



*Figura 2: Werth TomoScope® 200*

*Fuente: [2]*

### 1.1.2. Comparación de la CT con otras tecnologías

Algunos medios convencionales para el control metrológico en el ámbito industrial anteriores a la CT son las máquinas de medir por coordenadas (MMC) o instrumentos de medición óptica, tales como microscopios. Las máquinas de medir por coordenadas generalmente tienen un palpador de punta de rubí el cual recorre la superficie a medir, mientras el software de la máquina registra la posición de los puntos y reconstruye el contorno de la pieza virtualmente. Los microscopios, en cambio, se sirven del reflejo de una luz enfocada sobre la superficie de la pieza para capturar imágenes de la misma. Con un amplio número de imágenes, se puede reconstruir la geometría superficial de la pieza.



*Figura 3: Máquina de medir por coordenadas (MMC) en la Universidad de Zaragoza*

*Fuente: elaboración propia*

La Figura 4 muestra un gráfico que compara técnicas de ensayos no destructivos (END) que son típicamente utilizadas tanto para la detección de defectos en materiales como para mediciones dimensionales. Este gráfico está organizado según la ubicación detectable de defectos en relación con la superficie y la resolución espacial. De acuerdo con esto, los métodos ópticos pueden lograr

resoluciones de medición relativamente altas en el rango de nanómetros cuando se emplean técnicas de interferometría, pero, para especímenes opacos, solo pueden inspeccionar la ubicación de defectos en la superficie (o a través de una apertura superficial). Las pruebas de corriente de Foucault y las técnicas ultrasónicas pueden detectar defectos dentro del volumen, pero el inconveniente es la limitada resolución espacial de detección, que está en el rango de milímetros o alguna fracción de milímetros en las situaciones óptimas y con una resolución que típicamente disminuye con la profundidad del defecto por debajo de la superficie. En contraste, el mejor método para la inspección no destructiva de estructuras y geometrías complejas dentro del volumen de una pieza es actualmente la tomografía computarizada por rayos X, con un rango de resolución que va desde milímetros hasta nanómetros [1].

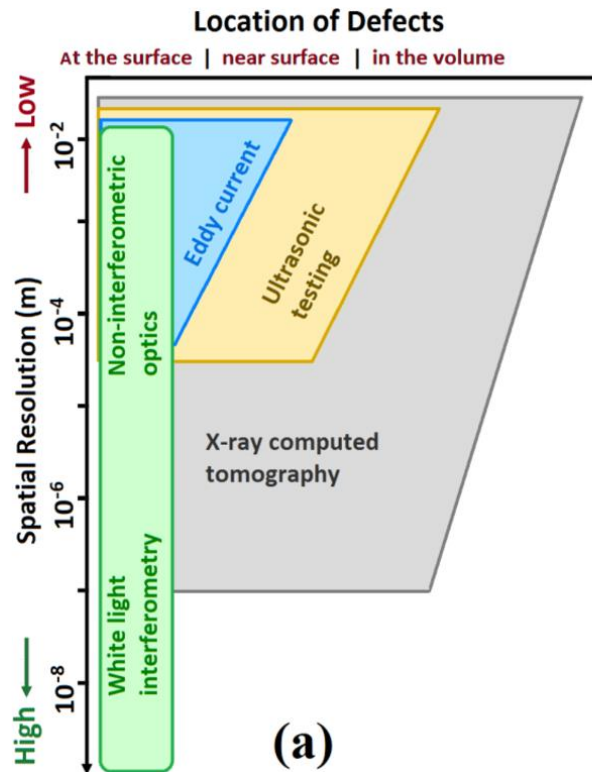


Figura 4: Comparación de END según localización de defectos y resolución alcanzable.

Fuente: [1]

Sin embargo, las resoluciones en el rango de micrómetros cubren típicamente la mayoría de las aplicaciones que se encuentran actualmente en la metrología dimensional industrial.

El límite inferior para el MPE (error máximo permitido) de los sistemas de CT por rayos X actualmente utilizados para la metrología dimensional suele estar en el orden de 3  $\mu\text{m}$  a 7  $\mu\text{m}$ , lo cual está típicamente en el mismo orden de magnitud que los tamaños de punto focal efectivos más bajos alcanzables por los tubos de rayos X instalados en tales sistemas.

La CT se trata de una tecnología versátil que puede determinar con precisión las dimensiones de estructuras internas u ocultas sin destruir la pieza. Las MMC o instrumentos de medición óptica como un escáner láser pueden medir la superficie externa de una pieza, pero no las estructuras internas inaccesibles para inspección táctil o basada en visión. Además, la fricción durante el deslizamiento añade una tensión de corte adicional y producirá desgaste en la superficie. En contraste, la metrología de CT por rayos X, al ser sin contacto, elimina las dificultades mencionadas anteriormente [1].

### 1.1.3. Funcionamiento de la tecnología

El uso de la tomografía de rayos X en la metrología industrial es fundamentalmente diferente de la CT en el campo médico. Para tomar imágenes radiográficas desde varias direcciones, la unidad de rayos X (fuente de radiación y sensor) en una máquina de CT médica se rota alrededor del paciente, que permanece estático. Sin embargo, para la tomografía industrial de rayos X, la unidad de rayos X generalmente permanece estacionaria y la pieza de trabajo se rota en la trayectoria del haz.

La tomografía de rayos X utiliza la capacidad de la radiación de rayos X para penetrar los objetos. Un tubo de rayos X puede considerarse casi como una fuente puntual de rayos X. Los rayos X pasan a través del objeto medido para alcanzar el sensor de rayos X. En su camino a través del objeto, una parte de la radiación es absorbida. Cuanto mayor sea la longitud penetrada del objeto, menos radiación escapa del lado opuesto del objeto. La absorción también depende del tipo de material.

Como se muestra en la Figura 5, un tomógrafo consta principalmente de una fuente de rayos X y un sensor de rayos X. El primero emite la radiación, que atraviesa la pieza, y el segundo recoge los rayos alterados por la pieza en el otro lado. Cabe destacar que para elevar las piezas que se quieren medir en la plataforma, se utiliza un utillaje de poliestireno expandido. Esto se debe a que este material es muy poco denso y a la hora de tomografiar materiales como polímero o metal que tienen mayor densidad, el poliestireno resulta invisible en la tomografía.

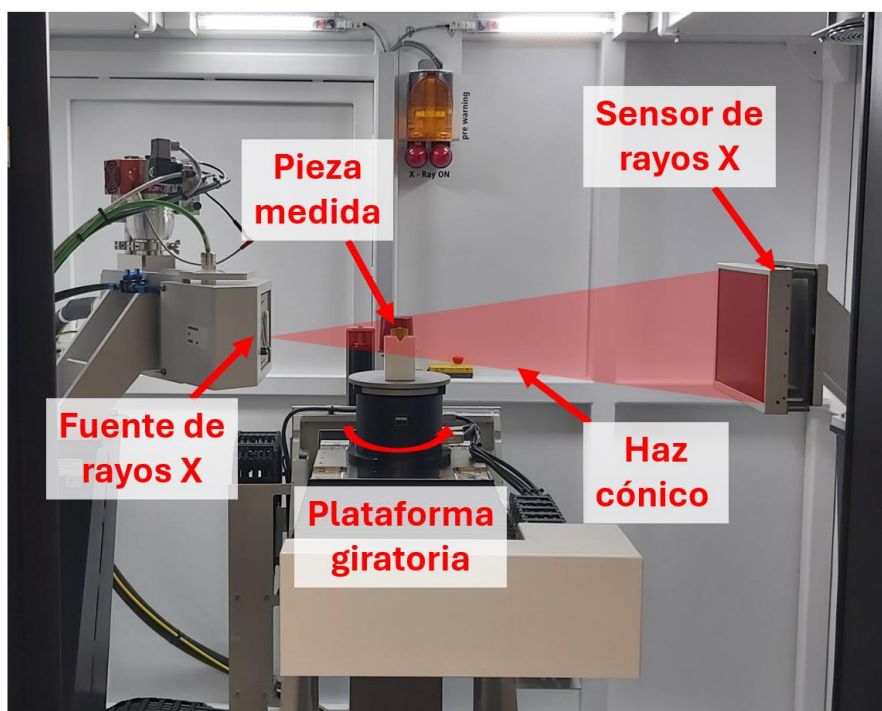
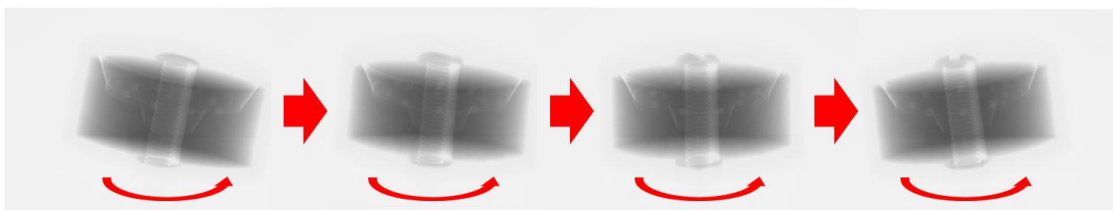


Figura 5: Componentes principales de un equipo de tomografía

Fuente: elaboración propia

La pieza objeto de medición va rotando, y una secuencia de imágenes es capturada al mismo tiempo (Figura 6). De este modo se obtiene una secuencia con el objeto medido en numerosas posiciones rotadas las cuales son conocidas con precisión. Y con ello más tarde el software permite crear una reconstrucción del volumen de la pieza.

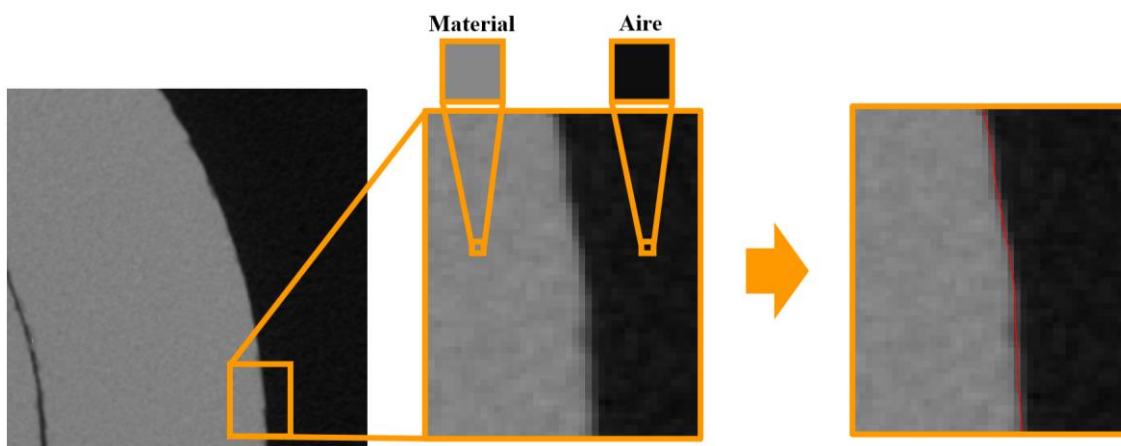


*Figura 6: Secuencia de imágenes capturadas en CT*

*Fuente: elaboración propia*

Para entender cómo se lleva a cabo la reconstrucción del volumen, es necesario conocer el concepto de vóxel. Un vóxel es un “píxel 3D” en el conjunto de datos volumétricos reconstruidos. Es un valor de datos que representa la absorción de rayos X en un elemento 3D ubicado en el espécimen que, a su vez, está ampliamente relacionado con la densidad promedio de material en el volumen. Los vóxeles oscuros representan áreas con baja absorción (aire), mientras que los vóxeles más blancos son áreas con alta absorción (material). De esta manera se crea un conjunto de vóxeles cuyo color va desde blanco hasta negro, es decir, una escala de grises. Se podría decir que un vóxel es un cubo de un tono de gris concreto.

Con la escala de grises del archivo escaneado, el software asigna un tono de gris para el material (o varios si se trata de varios materiales) y otro para el aire o ausencia de pieza. En las zonas de unión entre material y aire se generan las superficies, que delimitarán el volumen generado (ver Figura 7).



*Figura 7: Detalle de vóxeles de una sección de pieza y generación de superficies*

*Fuente: elaboración propia*

Los histogramas son una parte muy importante de la tomografía. Un histograma en tomografía es una representación gráfica de la distribución de las intensidades (o niveles de gris) de los píxeles (o vóxeles) en una imagen tomográfica. Consta de dos ejes: el eje horizontal (x) que representa los valores de intensidad o de escala de grises, y el eje vertical (y) que indica la frecuencia con la que se repite o *occurrence* de cada valor de nivel de gris. Los picos del histograma muestran cuántos píxeles tienen cada nivel de intensidad, permitiendo identificar la distribución de materiales en la imagen, evaluar la calidad de la imagen y detectar posibles defectos. Por ejemplo, en la Figura 8 se muestra un histograma en el cual se pueden diferenciar el pico del material y el pico del aire, por lo que sabemos que se trata de la tomografía de una pieza de un solo material. Además, la línea roja del centro es el umbral de separación entre aire y pieza, este es crítico para definir los límites entre diferentes regiones de la imagen.

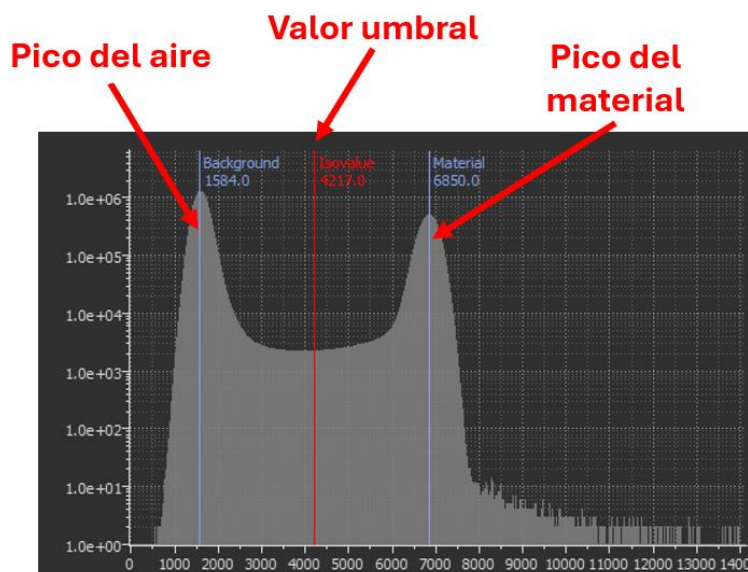


Figura 8: Histograma de tomografía

Fuente: elaboración propia

## 1.2. Estado actual de la CT

El desarrollo del mercado de la tomografía computarizada por rayos X en medicina, así como el progreso tecnológico adicional en esa industria, han sido bien documentados. Por el contrario, los mercados para la metrología dimensional de CT industrial todavía están en las primeras etapas de expansión.

Aunque otros sistemas de medición, por ejemplo, las MMC táctiles y ópticas convencionales, también pueden realizar mediciones dimensionales en componentes y ensamblajes industriales, la capacidad de la CT para medir características internas hace que la tecnología sea única en el mercado de herramientas de medición dimensional de la industria. De hecho, el uso de la CT para la medición dimensional está estrechamente vinculado a las tecnologías de fabricación aditiva (*additive manufacturing*, AM), o impresión 3D, como son conocidas popularmente. Esto es debido a que la AM permite la creación de geometrías complejas con características internas de manera “casi exacta”, y esto requiere a su vez de una tecnología de control de calidad capaz de inspeccionar estas características.

Sin embargo, actualmente no existen estándares internacionales para especificar procedimientos y proporcionar pautas para desarrollar un análisis de incertidumbre específico para mediciones de CT basado en modelos de la Guía para la Expresión de la Incertidumbre en la Medición (GUM). Hay estándares para guiar la estimación de la incertidumbre al utilizar MMC táctiles, pero para sistemas de medición de CT por rayos X (y ópticos) actualmente están en desarrollo. No obstante, se está trabajando en la definición de una normativa sólida. La razón de esta falta de estandarización internacional para la CT por rayos X es doble. Primero, mientras que las MMC táctiles han estado en el mercado durante más de 50 años, la CT por rayos X, como técnica utilizada para la metrología dimensional industrial, es relativamente nueva. Segundo, modelar la interacción entre una sonda táctil y una superficie, y determinar su respuesta, es un proceso relativamente simple; pero modelar el paso de los rayos X a través de un material presenta otro nivel de complejidad. Dado que las estimaciones de incertidumbre para la metrología dimensional con CT son necesarias para comparaciones de mediciones y aceptación de los resultados de la medición, el método de sustitución de las pautas ISO 15530-3 para MMC táctiles se ha adaptado durante la última década para la estimación de incertidumbres de medición en metrología de CT por rayos X.

Sin embargo, surgen problemas fundamentales al intentar comparar objetos que han sido calibrados utilizando sistemas táctiles con aquellos medidos utilizando CT por rayos X.

El enfoque actual aplicado por la Organización Internacional de Normalización (ISO), Comité Técnico 213 Grupo de Trabajo 10, es permitir la comparación de la CT con otras MMC táctiles.

La Figura 9 (a y b) (intencionadamente exagerada para facilitar la visualización) ilustra algunas de las dificultades encontradas al medir superficies con instrumentos basados en punta, como las MMC táctiles. La Figura 9 (c y d) ilustra los desafíos encontrados al usar sistemas de medición ópticos y/o máquinas de CT por rayos X para determinar superficies. Por otro lado, en algunos casos, los sistemas de medición ópticos y de CT por rayos X pueden reconstruir superficies con componentes de longitud de onda más corta que la textura superficial (ondulaciones, rugosidades, etc.), como se ilustra en la Figura 9 (c), pero limitados por la capacidad de resolución en el rango de escala de grises de los vóxeles en los datos volumétricos de la CT.

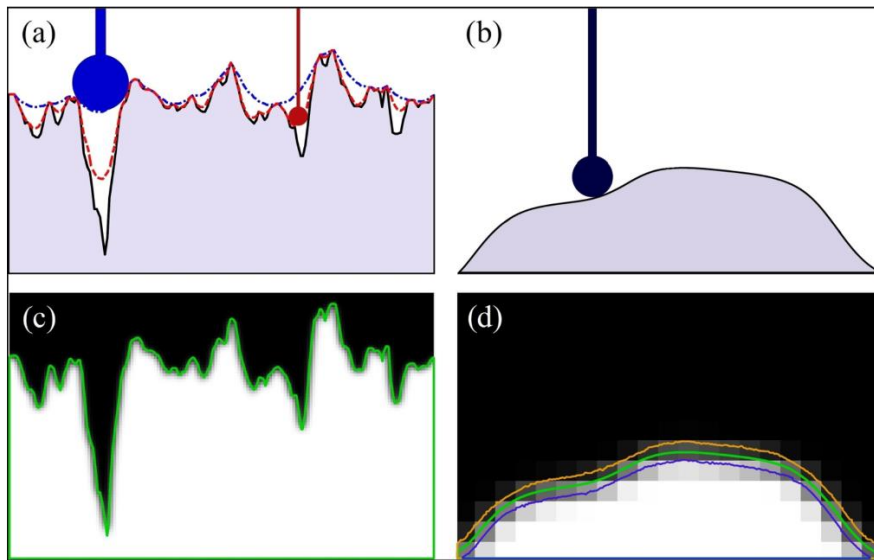
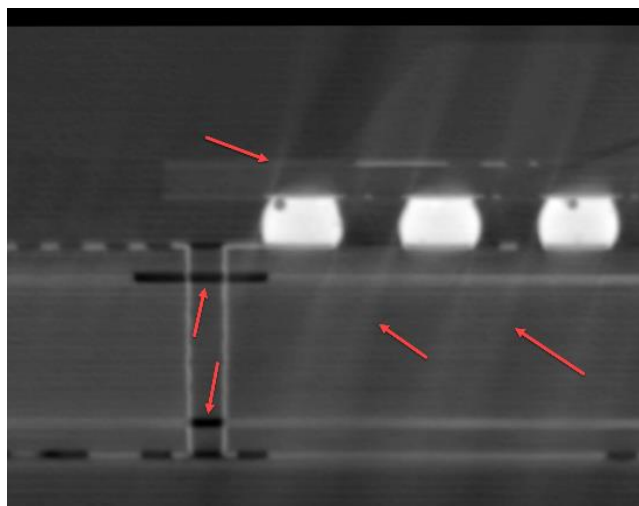


Figura 9: Reconstrucción de superficies por métodos táctiles (a y b) y ópticos (c y d)

Fuente: [1]

Los principales efectos que conducen a limitaciones en la calidad de la imagen y producen errores locales de límites a partir de algoritmos de umbral son; artefactos de imagen (debido al endurecimiento del haz “*beam hardening*”, la radiación dispersa “*scattering radiation*”, y/o efectos de haz cónico “*cone-beam effects*” entre otros), escalado de imagen, variaciones de temperatura ambiental, errores de discretización finita de vóxel, ruido (debido a la naturaleza estocástica del proceso de imagen) y el “desenfoque geométrico” de la imagen.

Uno de los principales desafíos es evitar los artefactos de imagen o *artifacts*, es decir, la presencia de características artificiales no despreciables que pueden aparecer en el volumen de CT reconstruido, o en las imágenes de CT, pero que no corresponden a estructuras existentes en el objeto escaneado. Estos artefactos son efectos no deseados que surgen de discrepancias entre los valores de absorción utilizados para calcular los datos de CT y la absorción (o atenuación) real del objeto.



*Figura 10: Artefactos en una radiografía de CT*

*Fuente: [3]*

### **1.3. El análisis de la porosidad en la CT**

La identificación y evaluación de defectos internos, como vacíos y porosidad, son cruciales en una amplia variedad de aplicaciones industriales, ya que hay una correlación directa entre el nivel de porosidad y las propiedades mecánicas de las piezas y materiales industriales.

Existen varias técnicas para la inspección de defectos internos, entre las más reconocidas se encuentran: las pruebas ultrasónicas, el método de Arquímedes y la materialografía.

Las pruebas ultrasónicas son END ampliamente utilizados en la industria aeronáutica para control de calidad, ya que son suficientemente confiables. El coeficiente de atenuación de las ondas ultrasónicas es lineal con la cantidad de porosidad en el material, siempre que los defectos sean esféricos y homogéneamente distribuidos. Sin embargo, si los defectos no cumplen con estas condiciones y los vacíos varían mucho en tamaño, la precisión disminuye significativamente.

El método de Arquímedes, que compara la densidad teórica con la real, también es no destructivo. Este método consiste en determinar la densidad real de una muestra comparando su peso en aire y en agua, para luego calcular el volumen de vacíos basándose en la diferencia entre la densidad real y la teórica sin vacíos. El mayor inconveniente de este método es que se debe conocer el valor exacto de la densidad de la muestra. Además, solo proporciona información general sobre el contenido total de vacíos, sin detallar la forma y distribución de los defectos.

La materialografía se basa en el análisis de imágenes de micrografías obtenidas de secciones transversales de la muestra, haciendo que este método sea destructivo. La preparación de la muestra es un proceso largo, ya que debe ser encapsulada en resina y luego se prepara una sección transversal plana. La superficie se lija con papel abrasivo de tamaño decreciente para lograr un acabado de alta calidad. Esta técnica es confiable, pero pueden surgir arañazos durante el proceso que se confundan con porosidad o, por el contrario, pequeños poros pueden ser ocultados. Además, si los poros no son homogéneos en forma y distribución, los resultados pueden ser inexactos [4].

Los avances recientes han demostrado que la CT por rayos X es una técnica 3D prometedora para la caracterización no destructiva de materiales y la metrología dimensional. La información que se obtiene de los conjuntos de datos de CT proporciona detalles volumétricos completos sobre la estructura y composición de la muestra, así como su forma interna y externa. Se puede extraer información detallada sobre la forma, tamaño y distribución de la porosidad/vacíos internos sin

destruir la muestra, lo que convierte a la CT en una herramienta única para la evaluación de defectos internos. Sin embargo, como se ha comentado anteriormente, la precisión de las mediciones de defectos internos mediante CT sigue en investigación y se necesita un método de validación metrológica.

#### **1.4. Objetivo y alcance del estudio**

Los defectos internos como inclusiones, poros e incluso grietas pueden afectar significativamente el rendimiento mecánico de cualquier producto. Actualmente, la tomografía computarizada (XCT) está ganando mucha atención debido a su capacidad para evaluar el interior de una pieza sin dañarla. No obstante, siendo una tecnología relativamente nueva en el ámbito industrial, presenta ciertas limitaciones. Una manera de enfrentar este desafío es diseñando piezas de "referencia". Este Trabajo Fin de Máster tiene como objetivo analizar la capacidad de detección de porosidad del nuevo sistema de tomografía Metrotom 800 225 kV de UNIZAR mediante el diseño de una pieza de referencia específica para este propósito.

La pieza se va a manufacturar mediante fabricación aditiva, con la maquinaria disponible en la EINA. Aunque no es un objetivo de este proyecto, este conlleva la exploración de los límites de detalle de los métodos de AM disponibles en la Universidad de Zaragoza. De igual manera, el Autor debe aprender a utilizar el software especializado, tanto para la fabricación como para la tomografía.

El alcance del trabajo se centra en el estudio de piezas de polímero, con tamaños de defecto por encima de los 100 micrómetros. En este análisis no se va a trabajar con otros materiales que no sean polímero, ni se va a conseguir fabricar poros más pequeños de lo indicado debido a las limitaciones del proceso de fabricación aditiva empleado.

## 2. Diseño del patrón

En este punto se presenta la maquinaria involucrada en la fabricación, medición y tomografía de la pieza patrón desarrollada en el presente trabajo. Asimismo, se presenta la propia pieza y sus razones de diseño.

### 2.1. Máquinas e instrumentación

#### 2.1.1. Objet Eden 350V

Esta máquina de Stratasys [5] utiliza la tecnología de impresión PolyJet. Se trata de una máquina de AM. La cual imprime por capas de hasta 16  $\mu\text{m}$  en un material de resina fotopolimerizada, que va endureciendo con la luz de unas lámparas ultravioleta que se encuentran en el propio cabezal de impresión.

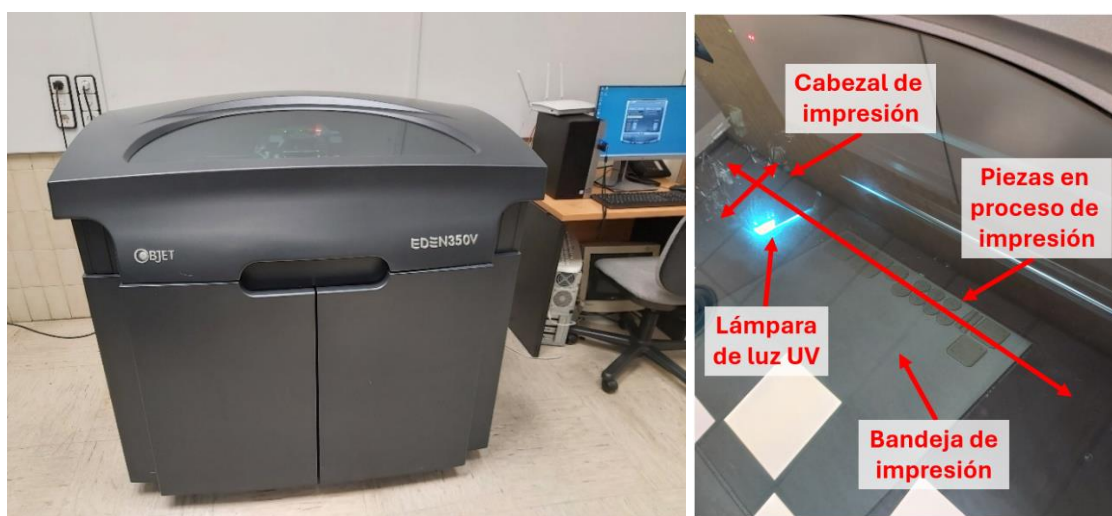


Figura 11: PolyJet Eden 350V

Fuente: elaboración propia

El material empleado en la fabricación de la pieza es el Fullcure RGD720 [6]. Se trata de un material óptimo para modelado de conceptos, realizar pruebas de forma y ajuste de prototipos, debido a su consistencia sólida y su color traslúcido.

#### 2.1.2. Zeiss Metrotom 800 225 kv

La Zeiss Metrotom 800 de 225 kv [7] es el modelo de tomógrafo que se encuentra en la EINA, si bien el ejemplar allí disponible se encuentra limitado a 199 kv de operación por temas de seguridad.

Las partes que conforman la máquina de tomografía son las mismas que ya se han descrito en el apartado “1.1.3. Funcionamiento de la tecnología” del presente trabajo.

La Zeiss Metrotom 800 permite realizar la tomografía de objetos y materiales de hasta 5 kg de peso. Las mediciones pueden durar desde 5 a 10 minutos para piezas más simples y pequeñas hasta varias horas para piezas más grandes y complejas. Una vez terminada la tomografía, el software de Zeiss reconstruye el volumen en un archivo 3D, sobre el que después se pueden realizar mediciones, inspecciones, etc.

La precisión de esta máquina oscila alrededor de los  $4.5 \mu\text{m} + L(\text{mm})/100$ , donde L es la longitud medida. Esto significa que la precisión depende de la longitud de la pieza que se está midiendo, con una precisión base de 4.5 micrómetros y un aumento proporcional a la longitud de la pieza.



*Figura 12: Zeiss Metrotom 800*

*Fuente: elaboración propia*

### 2.1.3. Alicona InfiniteFocusSL

InfiniteFocusSL es un sistema de microscopía que permite realizar mediciones ópticas de una superficie y genera un archivo 3D a partir de ellas. Se pueden evaluar tanto la forma como la rugosidad de los componentes estudiados. Permite una distancia de trabajo de hasta 33 mm, con un campo de medición de 50 mm x 50 mm. Posee un láser coaxial que facilita un enfoque rápido y preciso. Con una interfaz de automatización, InfiniteFocusSL puede ser utilizado para mediciones totalmente automáticas.



*Figura 13: Microscopio Alicona.*

*Fuente: elaboración propia*

En la Tabla 1 se pueden ver las diferentes propiedades que cada uno de los objetivos permite alcanzar con este microscopio. No obstante, en las mediciones realizadas en este trabajo se ha empleado el objetivo de 4 aumentos.

Propiedades de medición Alicona InfiniteFocusSL según objetivo										
Objective name		10x	20x	50x	2xSX	4xAX	5xAX	10xAX	20xAX	50xSX
Working distance	mm	17.5	16	10.1	34	30	34	33.5	20	13
Lateral measurement area (X,Y) (X x Y)	mm mm <sup>2</sup>	2 4	1 1	0.4 0.16	10 100	4.87 23.72	3.61 13.03	2 4	1 1	0.4 0.16
Vertical resolution	nm	100	50	20	3500	620	460	130	70	45
Height step accuracy (1 mm)	%	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
Max. measurable area	mm <sup>2</sup>	2500	2500	2500	2500	2500	2500	2500	2500	2500
Min. measurable roughness (Ra)	μm	0.3	0.15	0.08	n.a.	n.a.	n.a.	0.45	0.25	0.15
Min. measurable roughness (Sa)	μm	0.15	0.075	0.05	n.a.	n.a.	n.a.	0.25	0.1	0.08
Min. measurable radius	μm	5	3	2	20	12	10	5	3	2

Tabla 1: Propiedades Alicona InfiniteFocusSL según objetivo

Fuente: [8]

Al tratarse de un equipo de medición óptica, parte de la precisión de las medidas queda sujeta al comportamiento de la luz en la pieza. Cabe destacar como limitación de este equipo que, para agujeros por debajo del milímetro de diámetro, cuya profundidad  $H$  es considerablemente mayor que su diámetro  $D$ , la luz no es capaz de escapar del orificio, por lo que no se consigue información acerca del fondo del mismo.

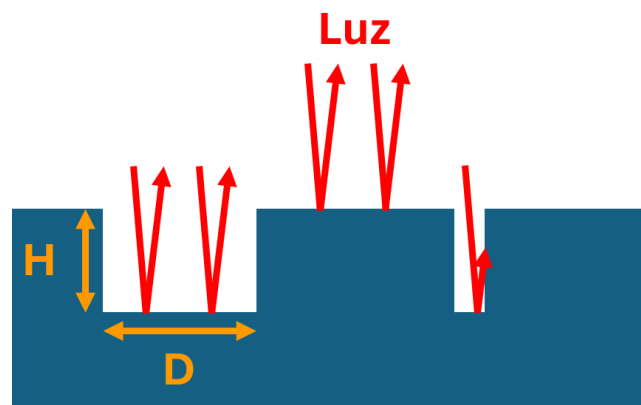


Figura 14: Limitación caracterización tamaño agujeros en microscopio

Fuente: elaboración propia

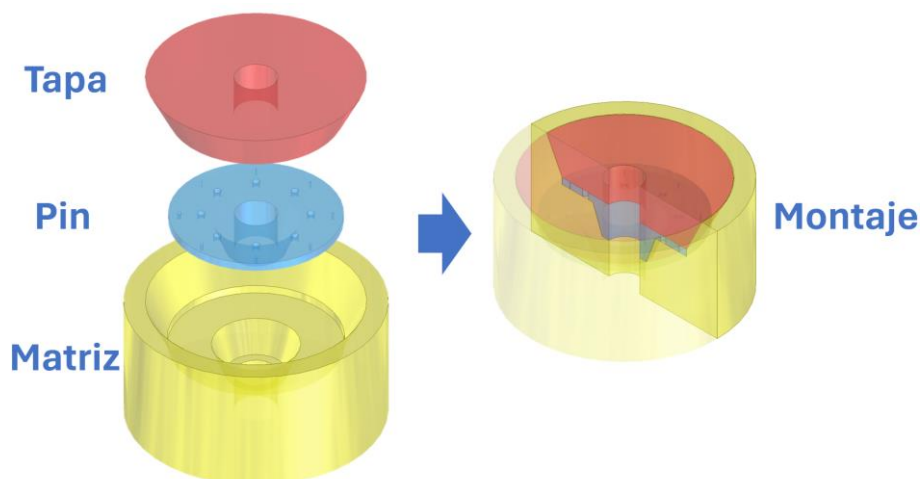
Debido a la alta precisión en  $Z$  del microscopio Alicona (620 nm), este será el equipo que se tome como referencia. Es decir, las medidas del microscopio se tomarán como referencia, y las de la tomografía se compararán con ellas.

## 2.2. Pieza patrón

En la actualidad existen numerosos estudios e informes que pretenden abordar el tema de la creación de piezas de referencia para el análisis de porosidad en equipos de XCT, como es el caso de [4], [9], [10], [11], [12]. En un primer momento, el diseño del patrón de este trabajo se nutrió de las fuentes citadas. Sin embargo, debido a las limitaciones del proceso de fabricación por AM, el diseño ha ido cambiando hasta llegar a la versión final. Por ejemplo, en las fuentes citadas los poros se generan como agujeros no pasantes mecanizados en aluminio, mientras que, en el diseño de este estudio, para elaborar agujeros en polímero por AM, estos se han realizado pasantes en la pieza. Para ver más sobre el proceso de diseño, ver el punto “Anexo A: Proceso de diseño de la pieza patrón”.

Una de las principales restricciones y la base de todo el diseño es que los poros puedan ser medidos tanto por la tomografía como por el microscopio, ya que este es el equipo de referencia. Los poros tienen que ser accesibles de manera directa, por eso se ha diseñado un patrón desmontable.

La pieza patrón consta de tres componentes principales, una matriz, una tapa y un pin donde se sitúan unos agujeros pasantes de proporciones mínimas. El cometido de las tres partes es encerrar los agujeros, para dar lugar a poros artificiales de dimensiones conocidas. El tamaño de los agujeros en los pines es progresivo, puesto que a priori no se conocía hasta que tamaño se obtendrían agujeros bien formados por medio de la AM con la PolyJet Eden 350V.



*Figura 15: Diseño del patrón de porosidad*

*Fuente: elaboración propia*

Para poder albergar mayor número de agujeros, se han creado dos modalidades de pines, el Pin A y el Pin B. Para cada uno de ellos se ha fabricado tres ejemplares, por un lado, para tener repuestos en caso de desperfecto o rotura durante el manejo de los pines y, por otro lado, para poder tener varias piezas entre las que contrastar medidas.

El diámetro nominal de los agujeros en el Pin A es de 0,10 mm; 0,15 mm; 0,20 mm; 0,25 mm; 0,30 mm; 0,35 mm; 0,40 mm; 0,45 mm. Mientras que en el Pin B el diámetro nominal de los agujeros es de 0,50 mm; 0,60 mm; 0,70 mm; 0,80 mm; 0,90 mm; 1,00 mm; 1,10 mm; 1,20 mm. Además, para todos aquellos agujeros cuyo diámetro nominal es menor de 0,90 mm se le ha añadido un agujero complementario de 0,90 mm que permite ver el espesor de la pieza cerca del agujero inicial, ya que en ellos el microscopio Alicona no siempre es capaz de detectar el fondo,

por los motivos comentados en el apartado “2.1.3. Alicona InfiniteFocusSL”. Se han numerado los agujeros de cada pin para evitar confusiones posteriormente, como se muestra en la Figura 16.

El proceso completo de diseño del patrón se encuentra en el “Anexo A: Proceso de diseño de la pieza patrón”.

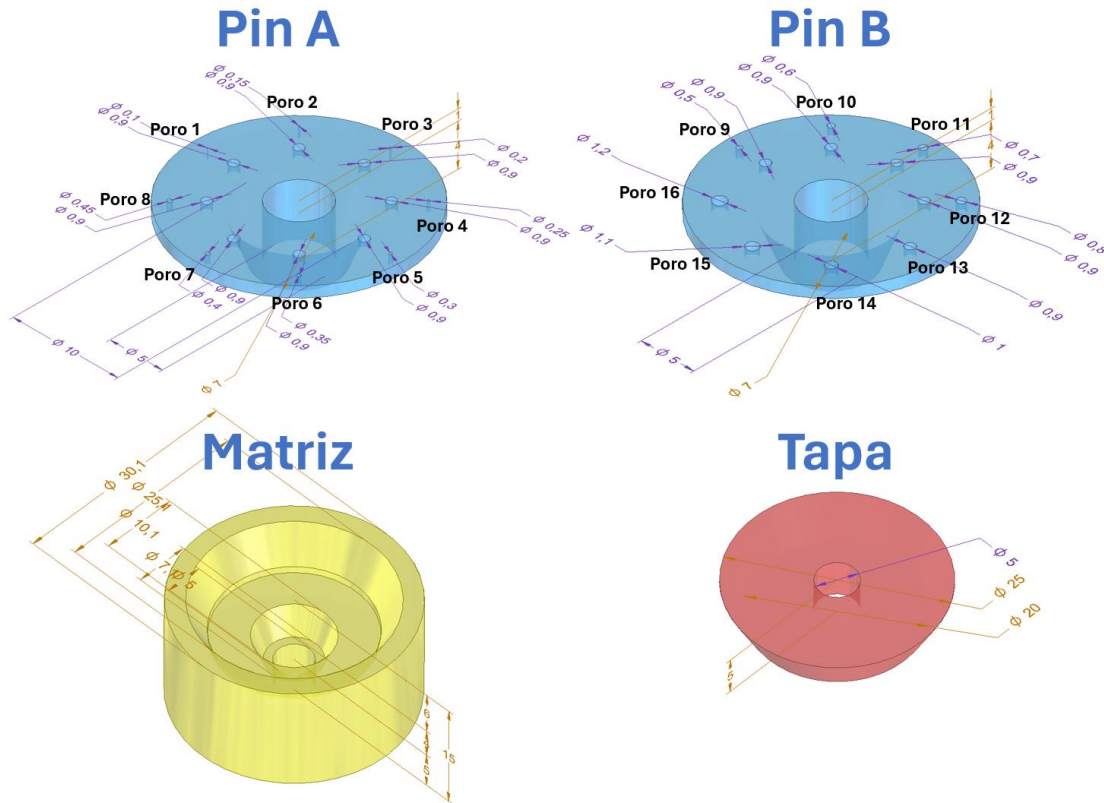
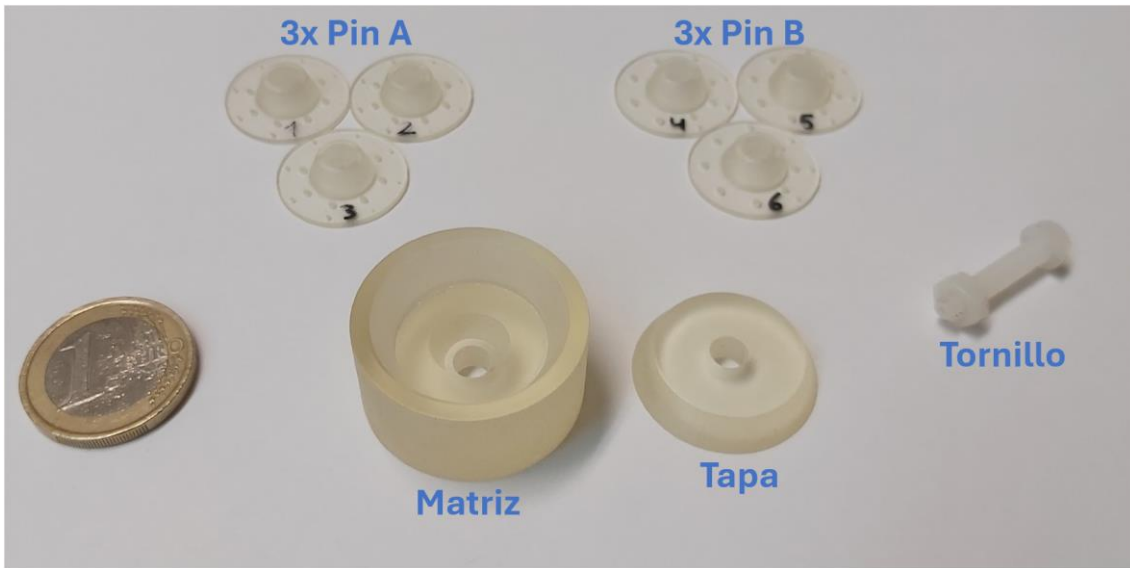


Figura 16: Dimensiones de los componentes del patrón y numeración de los poros

Fuente: elaboración propia

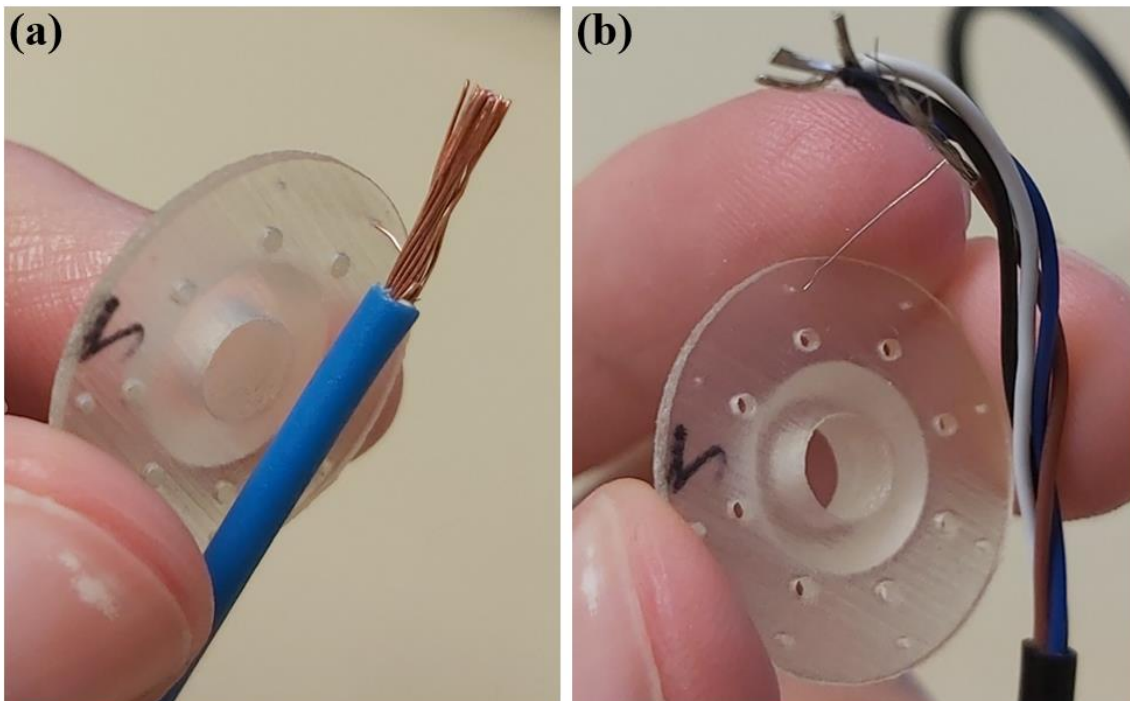
Los tres componentes están impresos mediante la PolyJet Eden 350V en material polimérico. El conjunto es comprimido por un tornillo igualmente de polímero. Que las propiedades de todos los componentes sean similares permite evitar problemas por multimaterial durante la tomografía.



*Figura 17: Patrón de porosidad*

*Fuente: elaboración propia*

Cabe destacar que, tras la impresión de las piezas, en el Pin 2 se ha realizado una limpieza manual del agujero 3 (diámetro nominal de 0,20 mm), y se ha intentado también en el agujero 1 y 2 (diámetro nominal de 0,10 mm y 0,15 mm respectivamente) pero sin éxito.



*Figura 18: Limpieza del Pin 2, exitosa en el Poro 3 (a) y fallida en los Poros 1 y 2 (b)*

*Fuente: elaboración propia*

### 3. Estudio

#### 3.1. Generación de archivos 3D

En primer lugar, se ha medido con el microscopio Alicona la superficie de los seis pines al descubierto, ya que estas medidas son las que se van a tomar como referencia (pues el microscopio tiene mayor precisión que la tomografía). Las mediciones con el microscopio se han realizado con unos ajustes de brillo de 13,4 ms y un contraste de 0,42, como se muestra en la Figura 19. Se han elegido estos valores porque proporcionan unas imágenes claras y con suficiente precisión. Cabe destacar que la repetición de las medidas ha resultado muy sistemática y cómoda gracias al uso de un utillaje diseñado específicamente para estas piezas en el microscopio, como se explica en el Anexo “A.5. Utillaje para microscopio”.

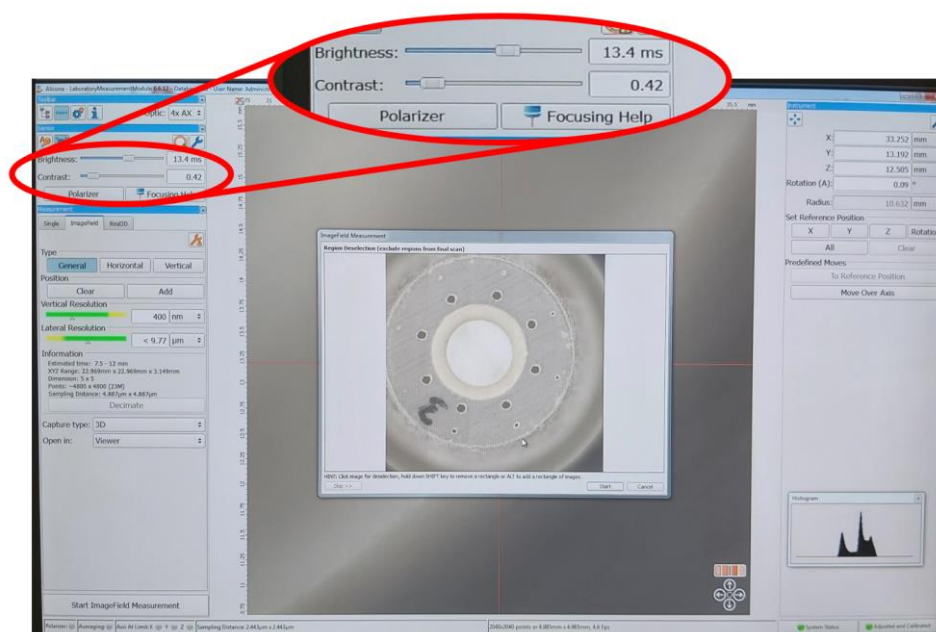


Figura 19: Configuración de microscopio Alicona

Fuente: elaboración propia

En la Figura 20 se ve el resultado 3D de estas mediciones en el microscopio.

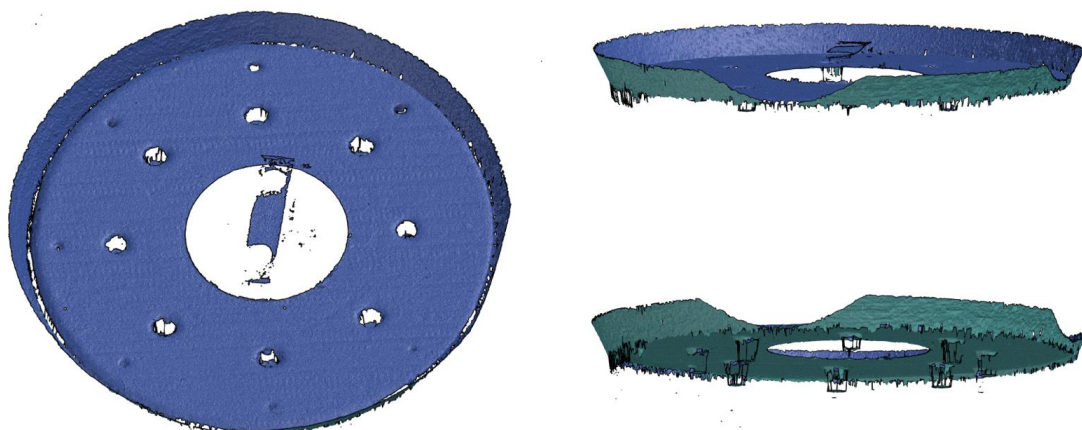


Figura 20: Volumen generado por Alicona para el Pin 1

Fuente: elaboración propia

En segundo lugar, se han tomografiado los seis pines Las tomografías se han tomado a 100 kv y con un tamaño de vóxel de 34  $\mu\text{m}$ . Se han elegido estos valores porque proporcionan unas imágenes claras y con suficiente precisión.

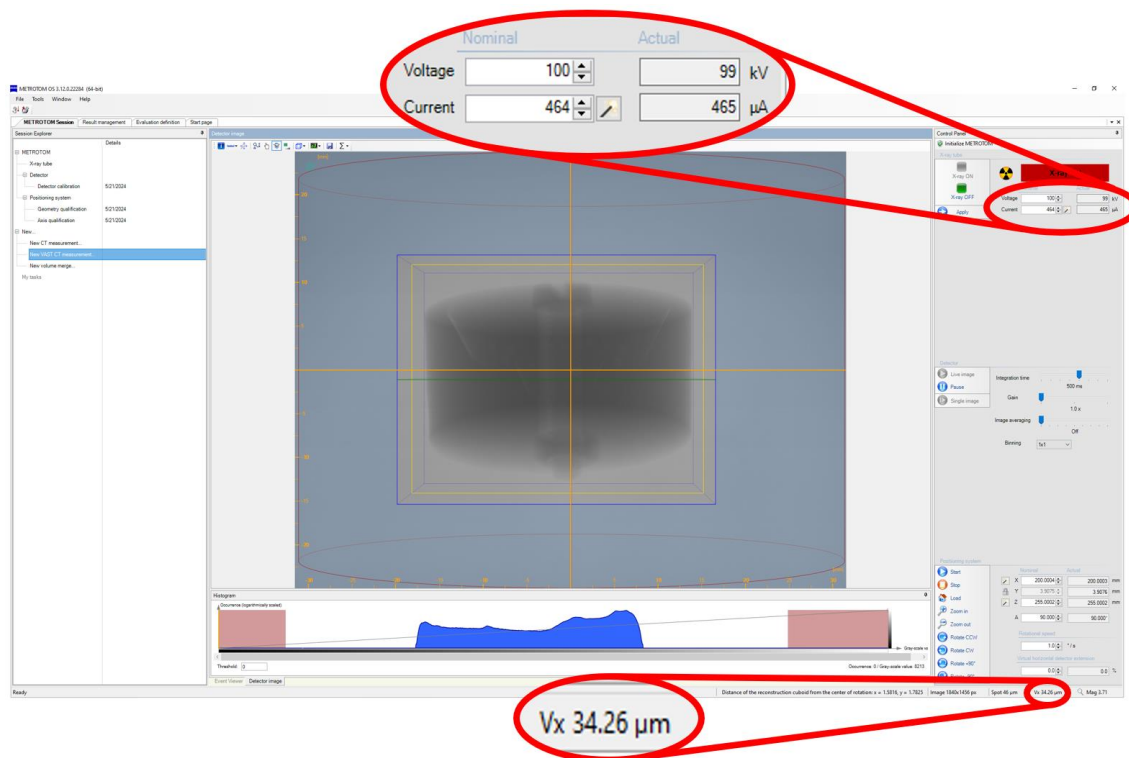


Figura 21: Configuración de tomógrafo Metrotom 800

Fuente: elaboración propia

Inicialmente, se han tomografiado los pines al descubierto o abiertos (es decir, sin encapsular entre la matriz y la tapa), para poder compararlos de manera directa con el archivo del microscopio, el cual también tiene información de los pines abiertos.

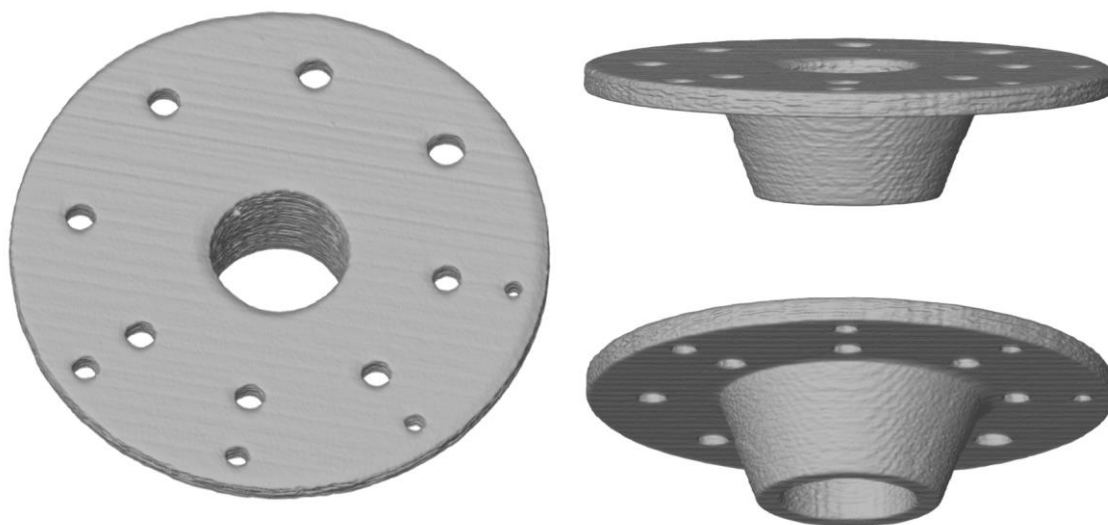


Figura 22: Volumen generado por tomografía del Pin 5 abierto

Fuente: elaboración propia

Se han alineado las superficies obtenidas con el microscopio y la tomografía, de manera que se puede observar que ambas mediciones arrojan unas dimensiones similares.

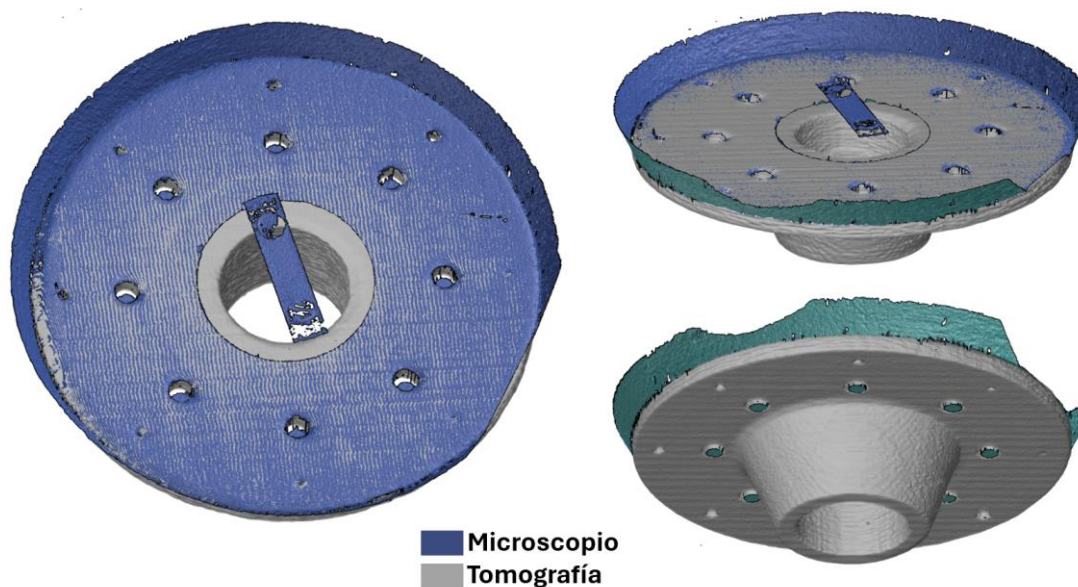


Figura 23: Alineación de archivos 3D del microscopio y tomografía para el Pin 3

Fuente: elaboración propia

Posteriormente, se han llevado a cabo las tomografías para los 6 pines encapsulados dentro de la matriz. Estas se han tomado igualmente a 100 kv y con un tamaño de vóxel de 34  $\mu\text{m}$ .

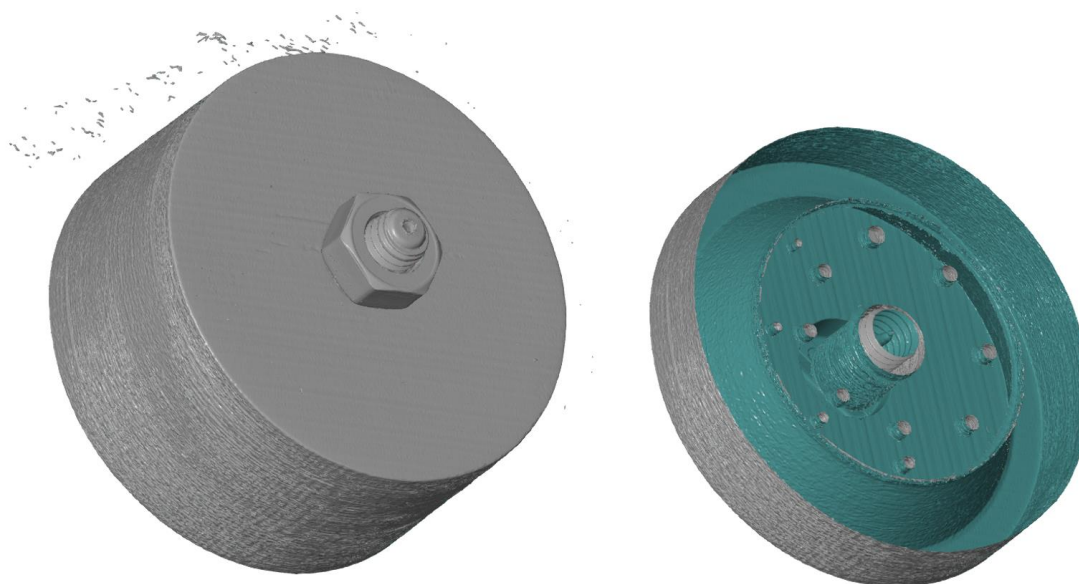


Figura 24: Volumen generado por tomografía del Pin 4 encapsulado

Fuente: elaboración propia

### 3.2. Inspección de los poros

Una vez generados todos los volúmenes, haciendo uso del programa Zeiss Inspect X-Ray [13] se han estudiado detalladamente las dimensiones de los poros. En el caso del microscopio, puesto que los poros obtenidos en el 3D tienen puntos en la entrada del agujero y del fondo del mismo (pero no de las paredes de este), se han tomado como dato los diámetros de los círculos de entrada

al poro y la altura o profundidad del mismo. Para el microscopio no ha sido posible formar cilindros de ajuste al poro por esta condición. En el caso de que el poro no haya sido fabricado con la suficiente precisión como para poder aplicarle este método, no se han tomado medidas de él, pues se considera un poro fallidamente fabricado.

En la Figura 25 se puede observar que para el Pin 3, el Poro 1 no tiene una forma suficientemente similar a un círculo como para poder tomar datos. Mientras que en el Poro 2, al ser más pronunciado, aunque tampoco pasante, se ha podido medir el diámetro y la altura del mismo.



Figura 25: Inspección de poros en volumen de microscopio del Pin 3

Fuente: elaboración propia

En el caso de la tomografía, se han asemejado a cilindros los poros que por su forma lo han permitido (ver Figura 27). En caso de no ser posible, se ha buscado asemejarlos a círculos (ver Figura 26). Y en caso de no lograr esto tampoco, no se han tomado medidas sobre ese poro, puesto que se ha considerado que no se ha logrado un defecto con unas dimensiones suficientemente aceptables.

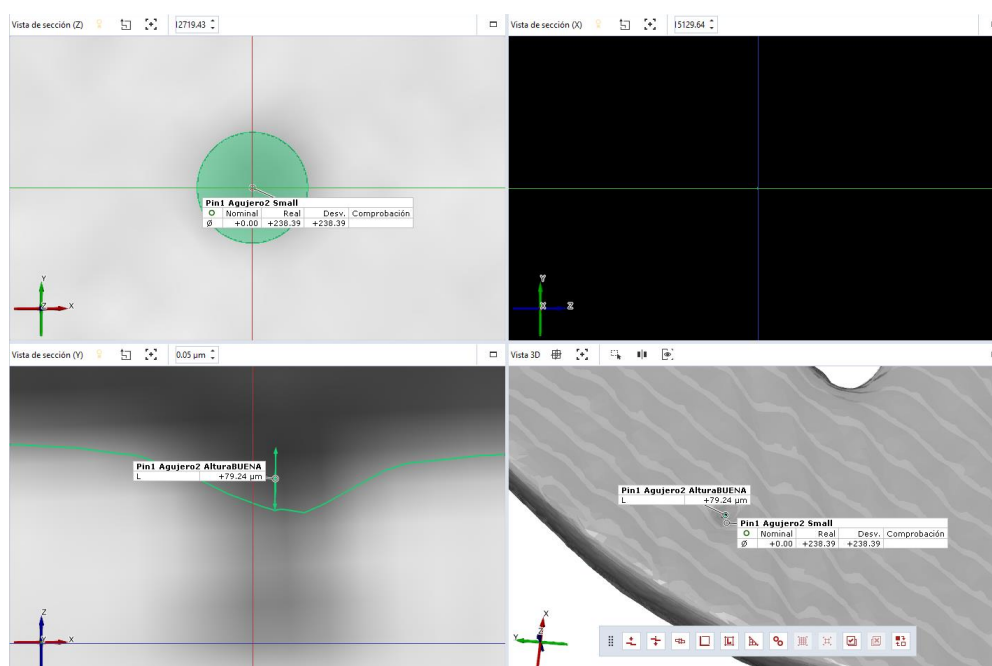


Figura 26: Inspección del Poro 2 Pin 3 en tomografía con círculo y altura

Fuente: elaboración propia

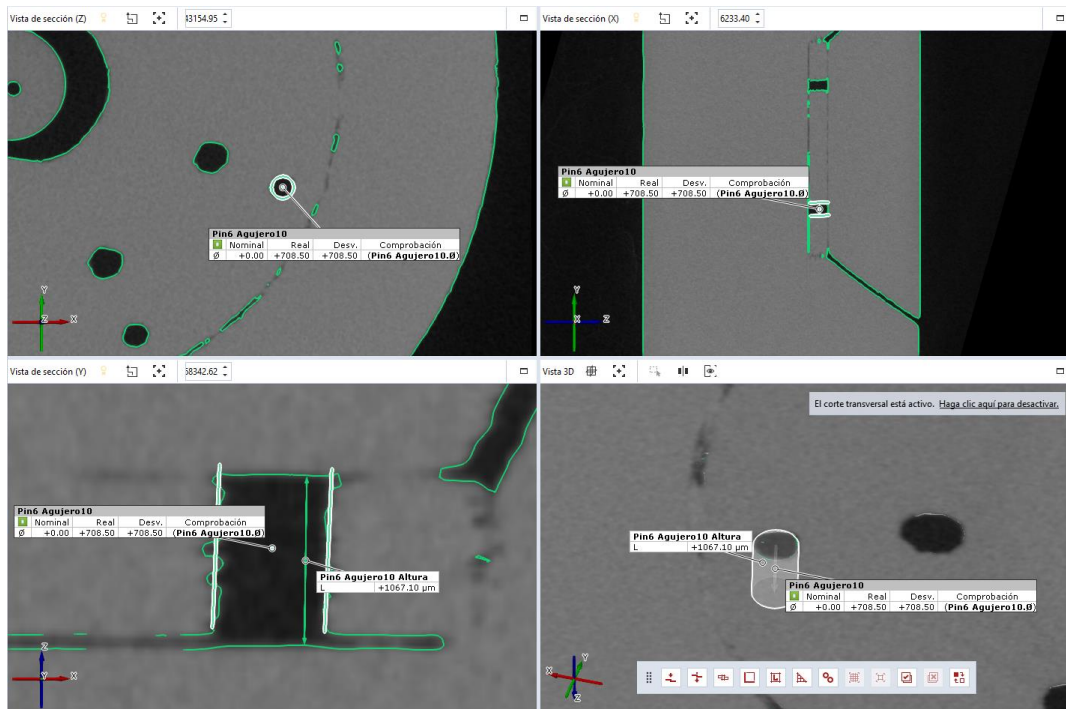


Figura 27: Inspección del Poro 10 Pin 6 en tomografía con cilindro

Fuente: elaboración propia

En el “Anexo C: Diferencias de procedimiento en el análisis de los datos” se explica más en detalle qué proceso se ha seguido en la formación de los cilindros, comparando varias formas de hacerlo que se han explorado durante la realización de este trabajo.

## 4. Resultados

Observando las secciones de los modelos 3D obtenidos en la tomografía de los pines encapsulados se aprecia lo siguiente. Hay poros que son solo muescas, ver Figura 28 (a). Otros poros, aunque muestran cierta continuidad, en la parte intermedia presentan incrustaciones irregulares de material, ver Figura 28 (b). El resto de los poros han resultado con una forma cilíndrica pasante como se esperaba, ver Figura 28 (c). Este nivel de acabado depende principalmente del diámetro del poro, para ver el aspecto de todos los poros acudir al “Anexo B: Tablas de resultados y gráficos”.

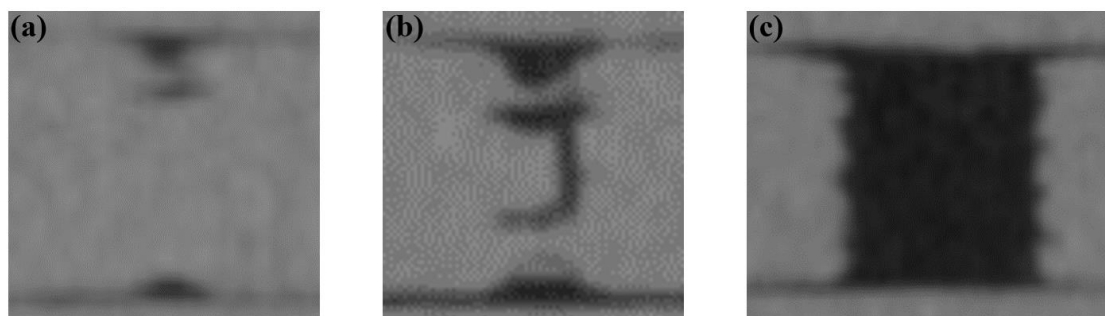


Figura 28: Poro no pasante (a), poro con irregularidades internas (b) y poro pasante (c)

Fuente: elaboración propia

Cabe destacar, según se ve en la Figura 29, que, en las zonas de unión de la superficie del pin con la matriz y la tapa, a pesar de que en el volumen generado en la tomografía parece haber una división o *gap* evidente entre los elementos, a la hora de generar la malla (que actúa como “piel” del cuerpo en el programa), el software no siempre hace esa división.

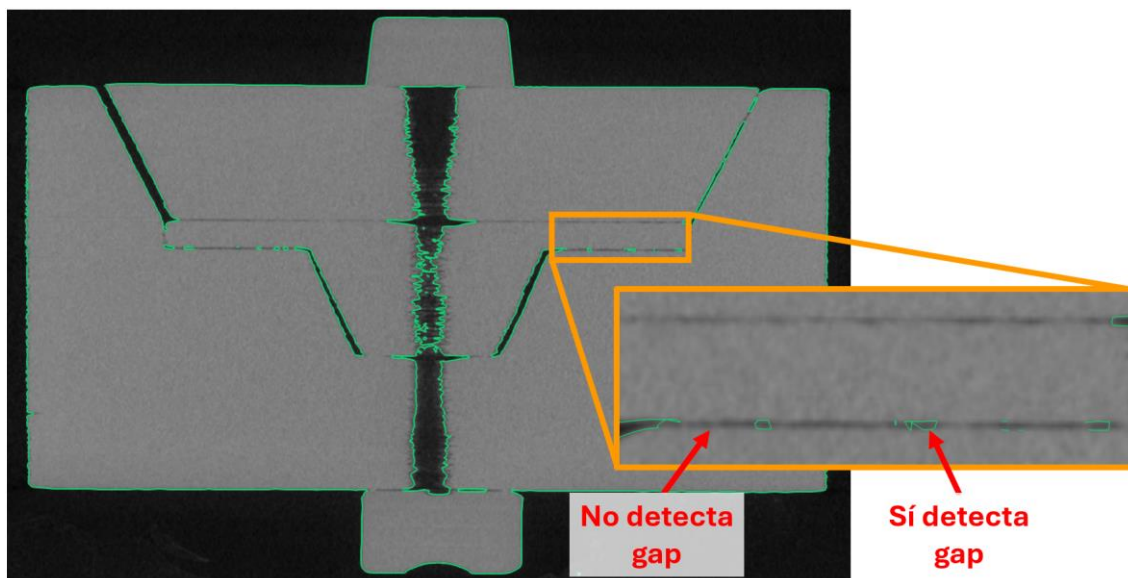


Figura 29: Detección irregular del gap por el software

Fuente: elaboración propia

### 4.1. Diámetros y alturas de la tomografía frente a referencia

En la Figura 30 se muestran los valores de la altura medida en los poros, diferenciando el método de medida (microscopio, tomografía de pines abiertos, o tomografía de pines encapsulados). Se puede observar que, aunque existe alguna variación evidente entre los métodos de medición, los tres métodos recogen la información de las alturas de manera similar. Siendo los poros más

pequeños de los Pines 1, 2 y 3 (Pines A) los que ofrecen mayor variabilidad, como era de esperar. Asimismo, se observa que en las tres gráficas el Pin 2 tiene unas alturas de poro mejor conseguidas que el Pin 3 y aún más logradas que el Pin 1. Esto es debido a que, tras la impresión de las piezas, en el Pin 2 se hizo una limpieza manual en el Poro 3, tal y como se explica al final del punto “2.2. Pieza patrón”.

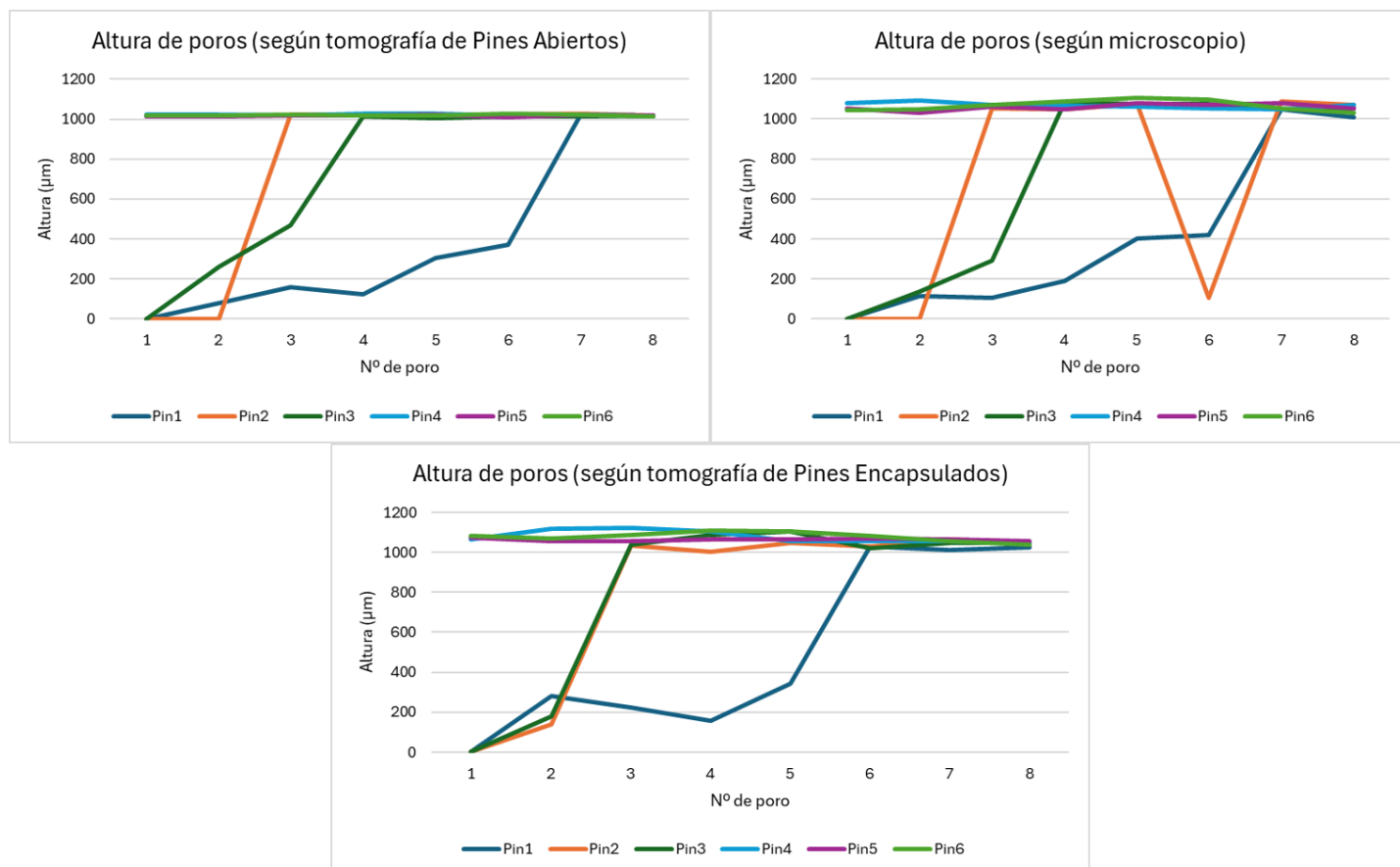


Figura 30: Altura de los poros según Pin y según método de medida

*Nota: Aunque los Nº de poro van solamente del 1 al 8 en la Gráfica. Esto aplica correctamente para Pines A (Pines 1, 2 y 3). Para Pines B (Pines 4, 5 y 6) el Nº de poro se corresponde con la numeración de la gráfica + 8. Por ejemplo: para el Pin 5 el Nº de poro 1 representa al 9, el 2 al 10, etc.*

*Fuente: elaboración propia*

Cabe destacar en la Figura 30 que en la Altura de poros (según microscopio) se observa un valor llamativo para el Pin 2 en el Poro 6. Se trata de un poro que en el microscopio se ha visto obstruido, y que sin embargo en la tomografía es claramente pasante en toda su longitud. En la Figura 31 se muestra esta dicotomía. Donde se ve que por medios ópticos el poro parece obstruido, sin embargo, la tomografía detecta claramente un agujero pasante en el pin. Esto se debe a que el agujero tiene material de soporte en su interior. La densidad de este es menor que la de la pieza, como se explica en el anexo “A.4. Prototipo final”. Por ello se observa en la tomografía Figura 31 (a) que el poro no es completamente negro, si no que hay material menos denso en su interior, y se observa que los medios ópticos como el microscopio en la Figura 31 (a) o la vista directa del poro en la Figura 31 (b), muestran que el poro está obstruido y no es pasante.

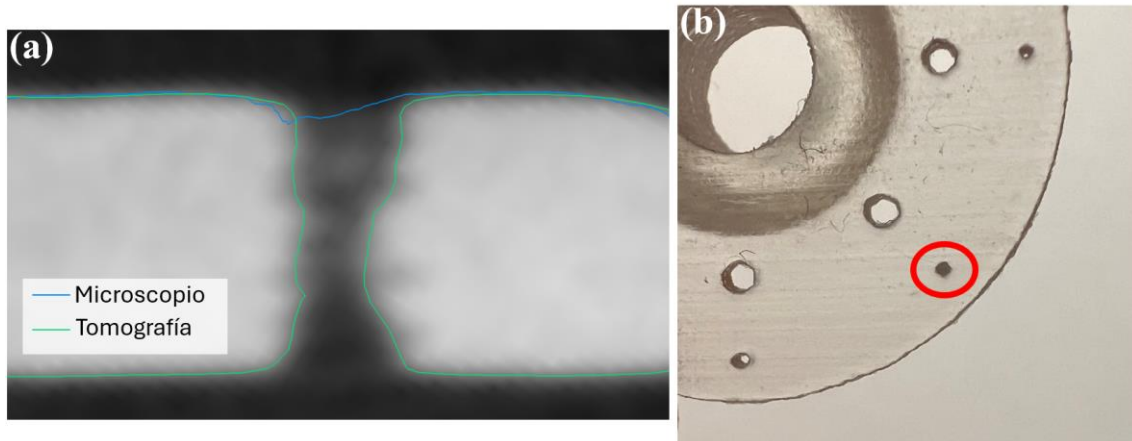


Figura 31: Poro pasante en tomografía pero obstruido en microscopio (a) y obstruido a la vista (b)

Fuente: elaboración propia

Igualmente, en la Figura 30 se puede observar cómo existe mayor variabilidad de alturas cuando los poros son encapsulados, esto es debido a la posible existencia del *gap* entre el pin, tapa y la matriz. Tal y como se muestra en la Figura 32. Este espacio solamente existe en el escenario de los pines encapsulados, ya que de otra forma se está midiendo directamente la altura del pin. Ya que este *gap* no siempre aparece, depende de la posición de apriete que el tornillo haya adquirido durante el montaje, pudiendo dar lugar a diversas posiciones del pin y la tapa respecto a la matriz.

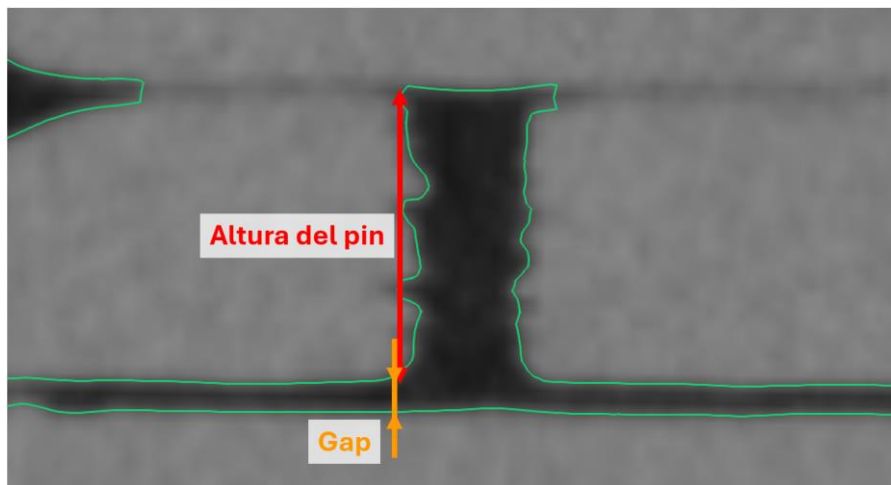


Figura 32: Gap entre pin y matriz

Fuente: elaboración propia

En la Figura 33 se pueden ver los valores de las medidas del diámetro de los poros, divididos según si las medidas han sido realizadas con el 3D generado por el microscopio, la tomografía de los pines abiertos, o la tomografía de los pines encapsulados. En general se observa para los tres métodos, que la evolución de los diámetros es ascendente y progresiva, como era de esperar ya que en el diseño de los poros así se ha establecido. Sin embargo, se observa que el diámetro en los pines 1, 2 y 3, al ser de menor tamaño y con más irregularidades, se ha interpretado de maneras más diferentes según los distintos sistemas de medida.

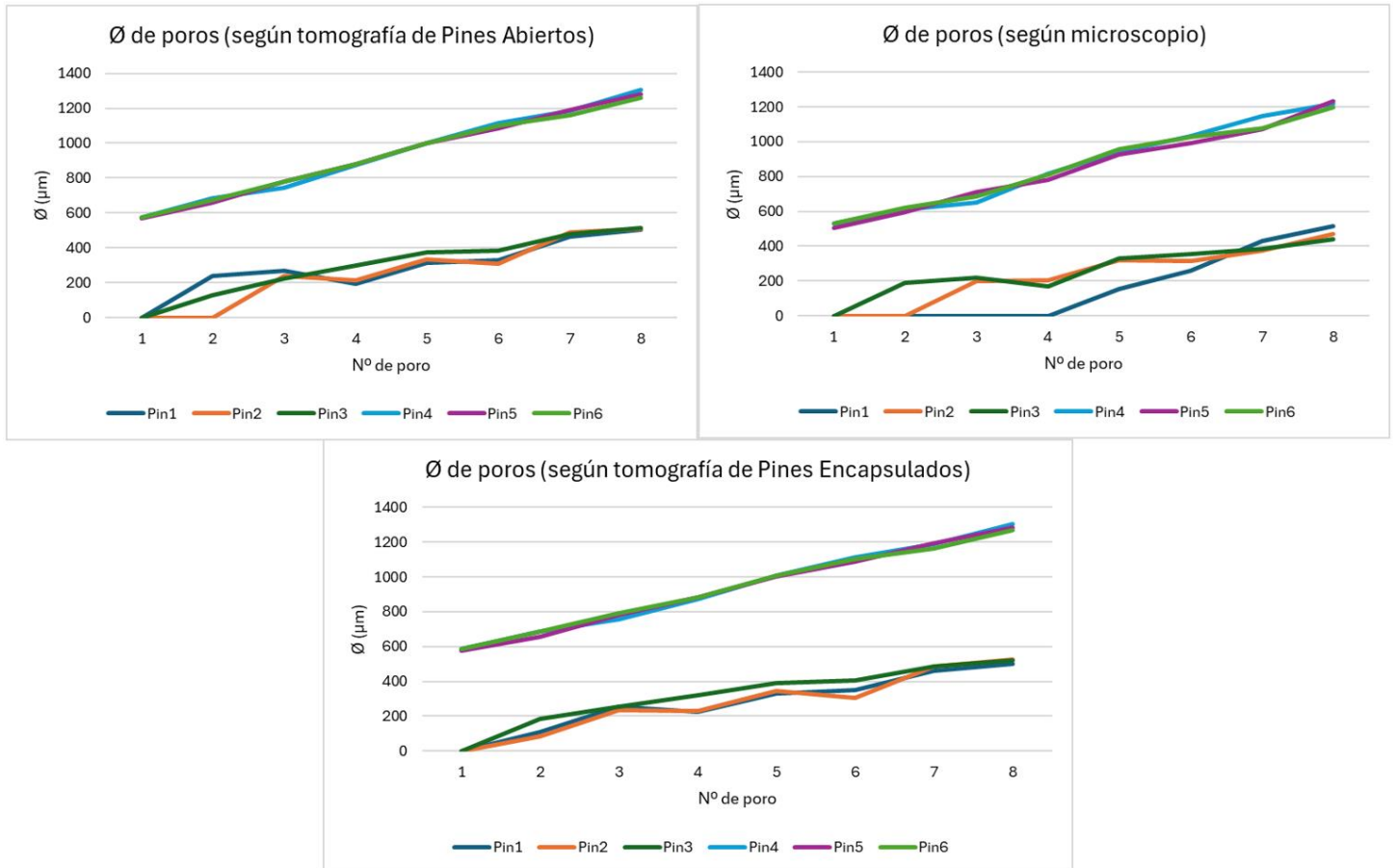


Figura 33: Diámetro de los poros según Pin y según método de medida

Nota: Aunque los Nº de poro van solamente del 1 al 8 en la Gráfica. Esto aplica correctamente para Pines A (Pines 1, 2 y 3). Para Pines B (Pines 4, 5 y 6) el Nº de poro se corresponde con la numeración de la gráfica + 8. Por ejemplo: para el Pin 5 el Nº de poro 1 representa al 9, el 2 al 10, etc.

Fuente: elaboración propia

Tomando el Pin 3 como muestra representativa de los tres primeros pines (Pines A), en la Figura 34 se observa que los diámetros medidos en la tomografía de pines encapsulados presentan unos valores ligeramente superiores a las mediciones en el microscopio. Calculando la desviación entre los dos equipos, haciendo la resta de la medida del microscopio menos la medida de la tomografía, se obtiene una desviación media de -68  $\mu\text{m}$  para las medidas de los ocho poros. Para ver el resto de los resultados, ver “Anexo B: Tablas de resultados y gráficos”.

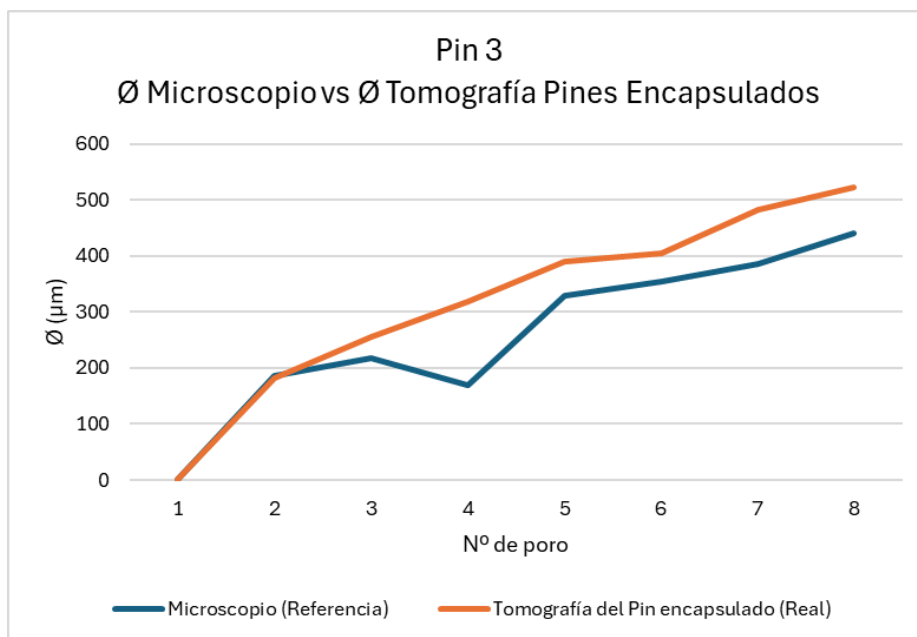


Figura 34: Gráfica Pin 3, Ø Microscopio vs Ø Tomografía Pines Encapsulados

Fuente: elaboración propia

En lo que respecta a las alturas del Pin 3, en la Figura 35 se aprecia que las medidas han resultado muy similares con los métodos, excepto por el Poro 3 donde hay más desviación. La desviación media entre los ocho poros del pin es de  $-110 \mu\text{m}$ . Si bien este valor está distorsionado por la desviación en el Poro 3. En este poro ha sucedido lo mismo que se veía en la Figura 31. Si excluimos este valor, la desviación media entre los otros siete poros del pin es solamente de  $-3,14 \mu\text{m}$ .

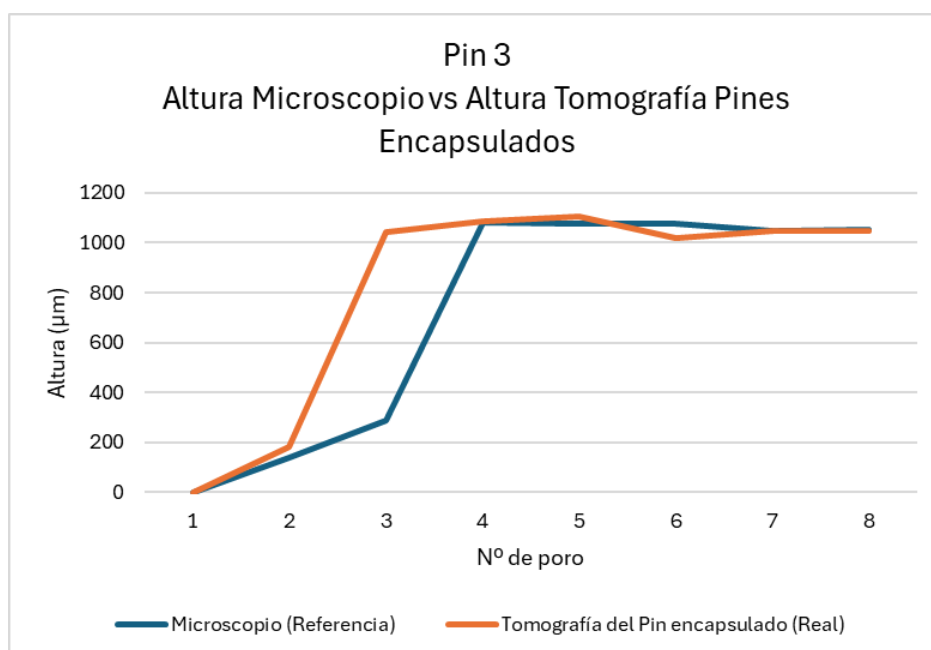


Figura 35: Gráfica Pin 3, Altura Microscopio vs Altura Tomografía Pines Encapsulados

Fuente: elaboración propia

Con el Pin 6 como muestra de los Pines 4, 5 y 6 (Pines B), en la Figura 36 se ve que los diámetros medidos en la tomografía son constantemente algo mayores que los medidos en el microscopio,

concretamente  $73 \mu\text{m}$  más de media, es decir, una desviación media de  $-73 \mu\text{m}$  haciendo la resta de la medida del microscopio menos la medida de la tomografía.

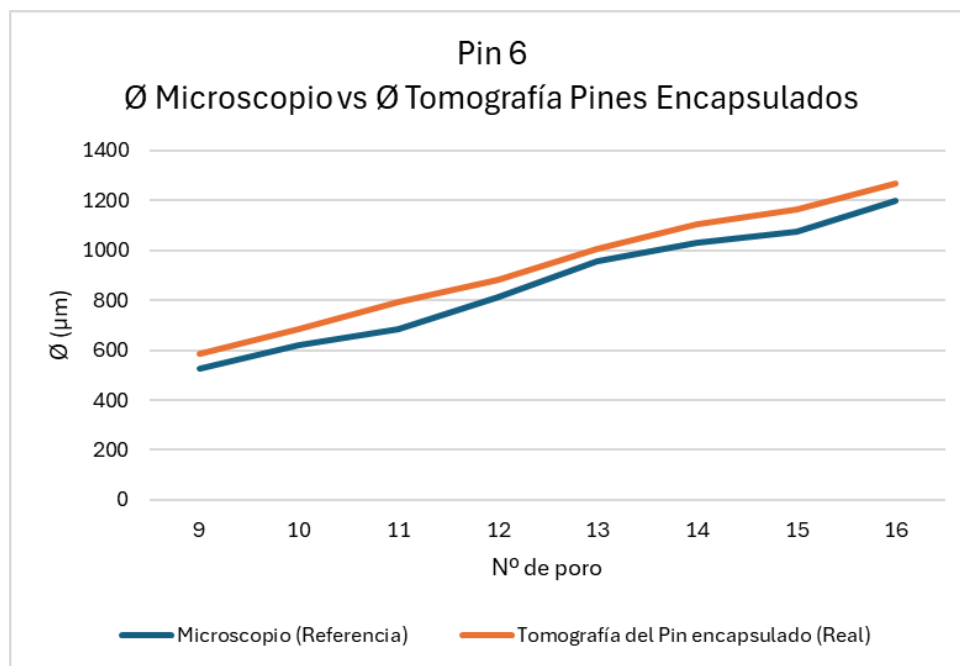


Figura 36: Pin 6, Ø Microscopio vs Ø Tomografía Pines Encapsulados

Fuente: elaboración propia

En cuanto a las alturas, en la Figura 37 se puede observar que el Pin 6 ha resultado tener un espesor mayor en el lado de los Pines 11 a 14. La desviación media entre las medidas del microscopio y de la tomografía es de  $-11 \mu\text{m}$ .

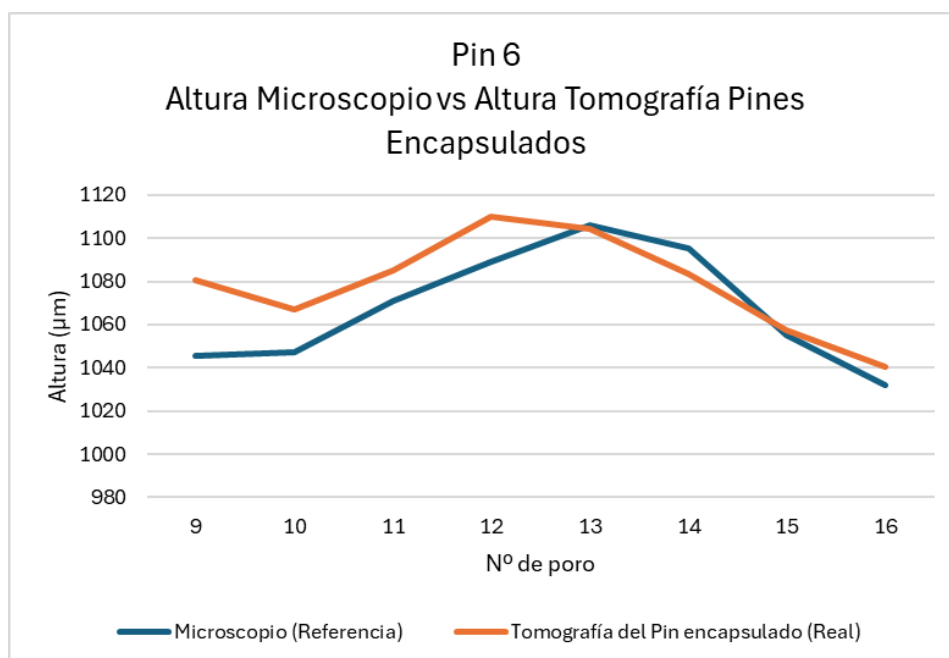


Figura 37: Gráfica Pin 6, Altura Microscopio vs Altura Tomografía Pines Encapsulados

Fuente: elaboración propia

La desviación media de todos los diámetros medidos en todos los poros de todos los pines en la tomografía de los pines encapsulados respecto al microscopio (referencia) es de  $-68,71 \mu\text{m}$ . La mayoría de las desviaciones ha resultado ser negativa, lo que quiere decir que los diámetros vistos en la tomografía son mayores que los vistos en el microscopio. Esto es coherente, ya que el microscopio solo es capaz de ver la pared más interior del agujero mientras que la tomografía ve todos los entrantes e imperfecciones interiores del poro, y haciendo un ajuste de esos puntos, es capaz de dar un diámetro mayor para el mismo poro.

Por otro lado, la desviación media de todas las alturas medidas en la tomografía de los pines encapsulados respecto a las medidas del microscopio es de  $-57,46 \mu\text{m}$ . Lo cual indica nuevamente que las alturas vistas en la tomografía son mayores que las vistas en el microscopio. Esto tiene sentido, ya que existe el *gap* que se ha comentado previamente, que añade altura a los poros en la tomografía.

De lo anterior se puede deducir que, los poros más pequeños, es decir, por debajo del diámetro teórico de  $0,40 \text{ mm}$ , resultan muy irregulares por medio del proceso de fabricación que se ha utilizado en este trabajo. Por ello, los pines por debajo de  $400 \mu\text{m}$ , son cilindros muy irregulares y tienen un proceso de medición poco repetible.

## 4.2. Cilindricidad de la tomografía de pines encapsulados frente a abiertos

Para evaluar la cilindricidad de los poros de los pines encapsulados no es posible comparar dimensiones con el equipo de referencia (microscopio), ya que este solamente es capaz de recoger datos de la apertura del orificio y del fondo de este si su tamaño lo permite. Por ello, para evaluar la cilindricidad, se va a tomar como referencia las medidas de la tomografía de los pines abiertos.

En la Figura 38 se muestra la desviación de la cilindricidad de todos los poros de los pines encapsulados respecto de los poros de los pines abiertos. Es decir, la diferencia del error de forma del poro abierto menos el poro encapsulado, esto para los 48 poros existentes. Hay poros en los cuales no existe el valor de la desviación, esto se debe a que esos poros no se han podido aproximar a cilindros (tal y como se explica en el punto “3.2. Inspección de los poros”), y por ello no pueden tener datos de cilindricidad.

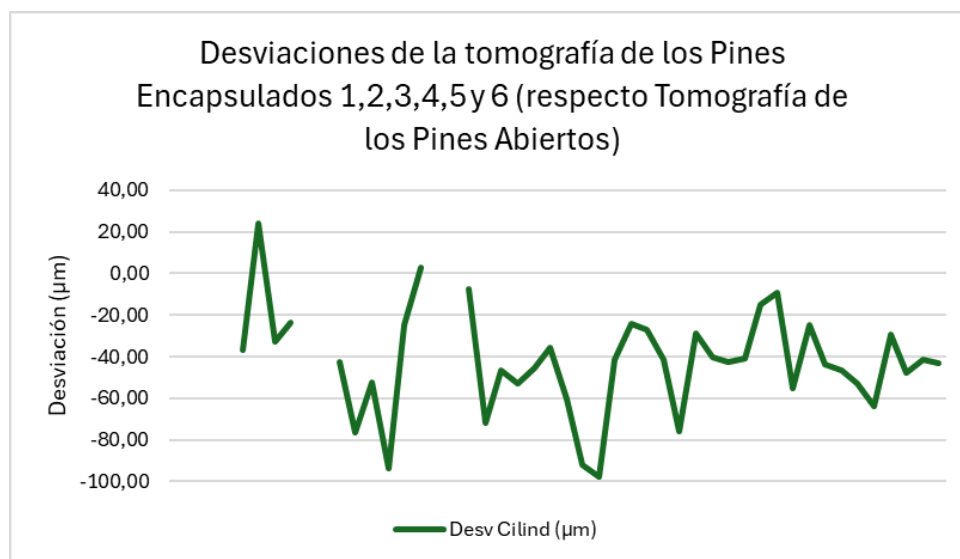


Figura 38: Desviaciones en la cilindricidad de los Pines Encapsulados respecto a los Abiertos

Fuente: elaboración propia

En total, la desviación promedio (haciendo la resta de los errores de los pines abiertos menos los errores de los pines encapsulados) para todos los poros de los seis pines resulta de  $-42,57 \mu\text{m}$  (siendo la cilindridad promedio de los pines encapsulados de  $148,32 \mu\text{m}$ , y la de los pines abiertos de  $105,75 \mu\text{m}$ ), lo que indica que los errores de forma o cilindridades de los pines encapsulados son mayores que en la tomografía de los pines abiertos. Esto es debido a que al tomografiarse un defecto encerrado, como es esperable, las dimensiones de este contienen más error del que tendrían si se tomografiase el mismo defecto al descubierto.

Cabe resaltar que este error de cilindridad es consecuencia principalmente de haber realizado el patrón mediante fabricación aditiva, que no otorga el mejor de los acabados en defectos interiores.

## 5. Estudio complementario de porosidad con software dedicado

En este apartado se ha buscado explorar las opciones de dos diferentes softwares que estudian porosidad en CT. Para ver en qué grado estos programas son capaces de detectar la porosidad generada de manera artificial en la pieza. Todo ello de manera cualitativa.

### 5.1. Módulo de porosidad de VGSTUDIO

VGSTUDIO [14] es un software de inspección visual para aplicaciones industriales como la tomografía computarizada.

Este software tiene una interfaz más amigable con el usuario, y permite hacer movimientos y operaciones de manera más intuitiva que el Zeiss Inspect X-Ray, que requiere de un mayor conocimiento sobre lo que se está haciendo y el tipo de órdenes que se pueden ejecutar.

En la Figura 39 se puede observar uno de los poros asimilado a un cilindro en VGSTUDIO.

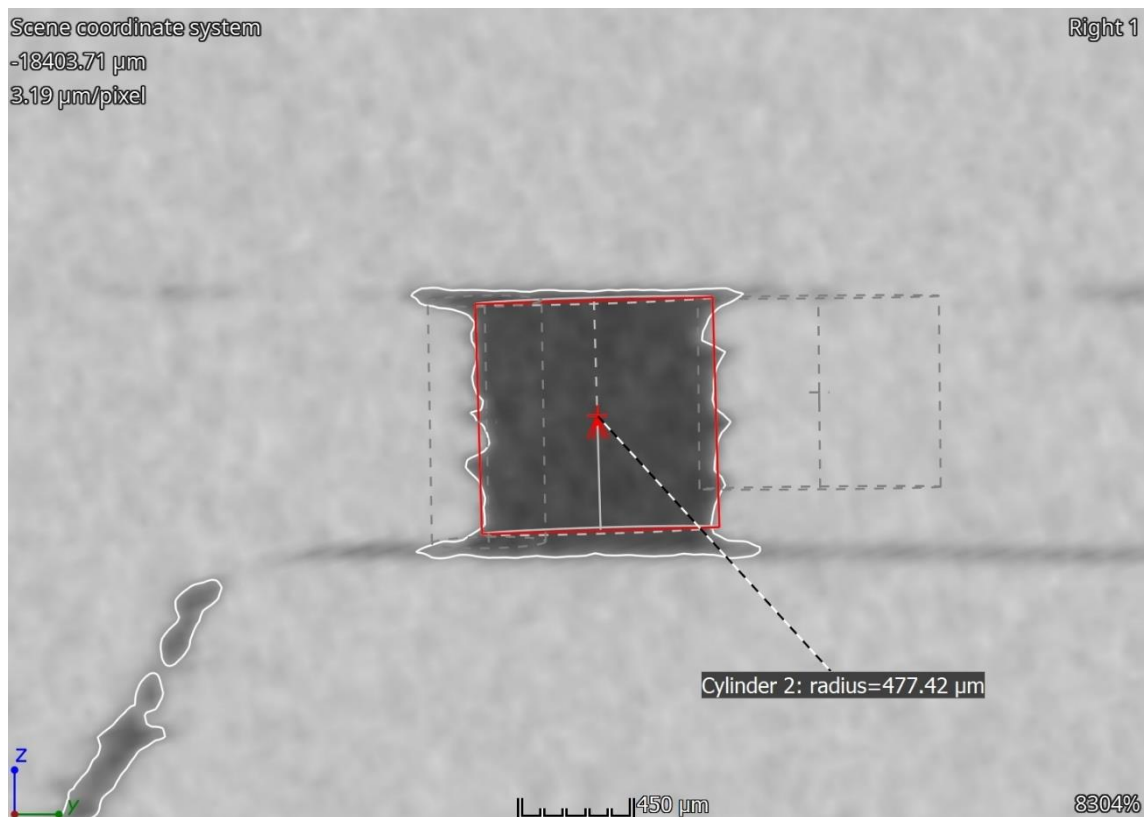


Figura 39: Poro aproximado a un cilindro en VGSTUDIO

Fuente: elaboración propia

En la Figura 40 se puede ver una sección del montaje del pin encapsulado, producto de tomografía. Así como un mapa de colores de los poros que ha encontrado en la pieza de manera automática para esa sección. De esto se puede deducir que el software detecta los poros artificiales como poros y proporciona dimensiones de ellos.

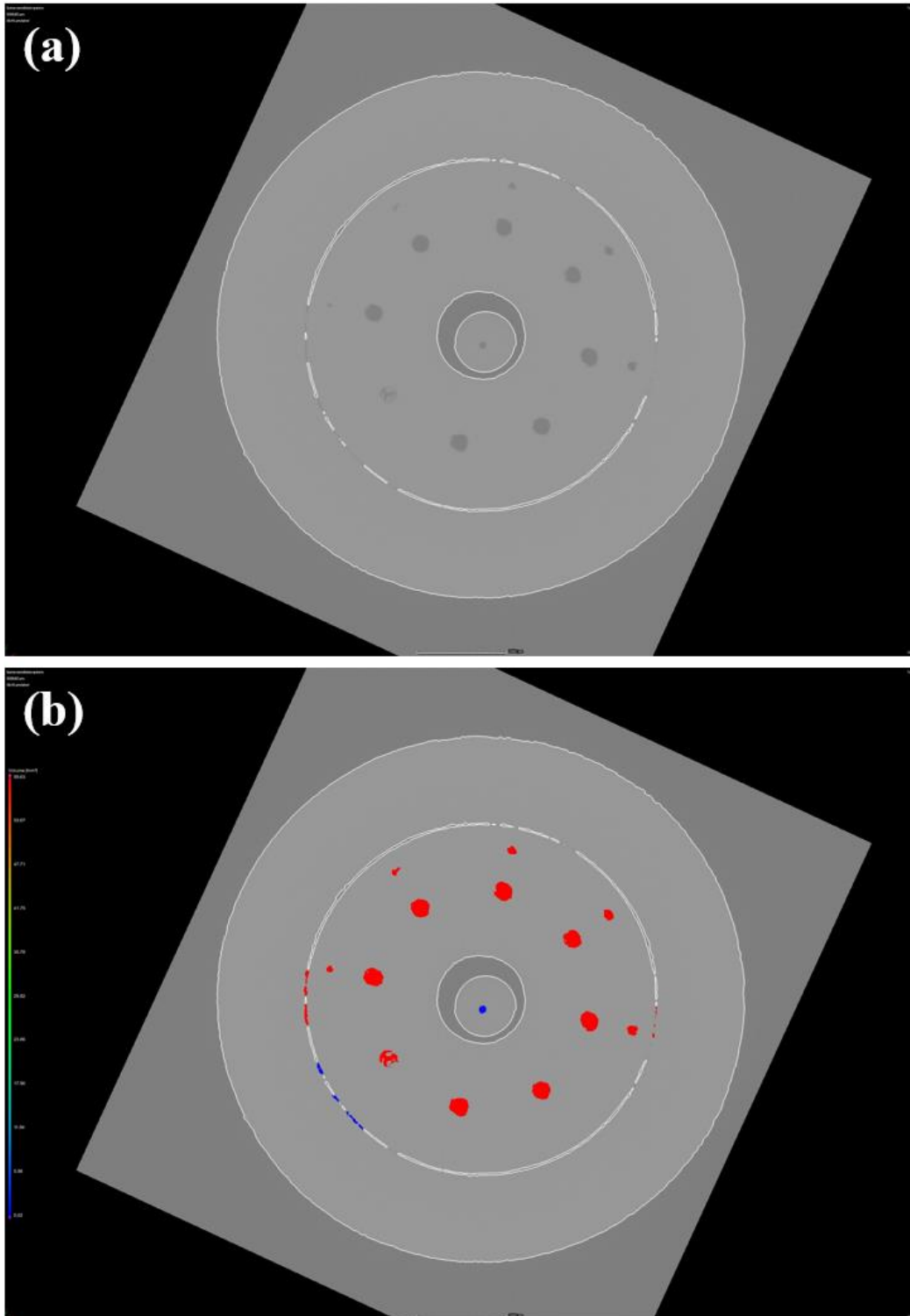


Figura 40: Sección del montaje (a) y detección automática de porosidad (b) en VGSTUDIO

Fuente: elaboración propia

Tal como se muestra en la Figura 41, la reconstrucción tridimensional de los poros (realizada con el algoritmo de porosidad *EasyPore*) muestra no solo los poros artificiales que han sido creados deliberadamente, sino que también expone el gap existente entre la tapa-pin y el pin-matriz, incluso de forma fácil de identificar poros internos del tornillo en la zona central. De igual forma, muestra algún poro real de la pieza, como los que se ven en la tapa en la parte superior.

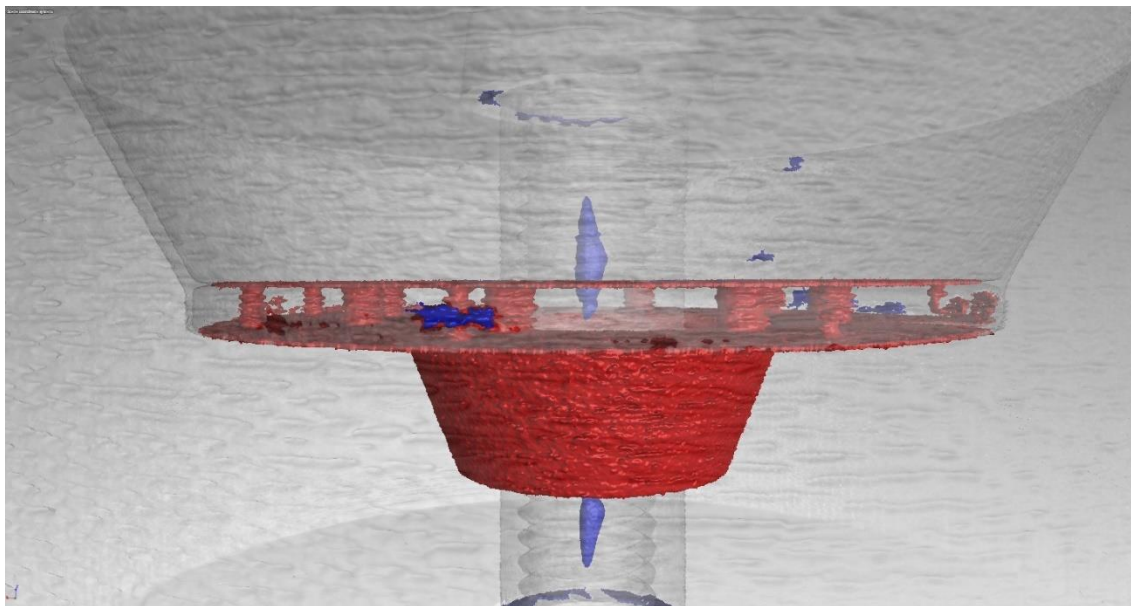


Figura 41: Vista 3D de porosidad en VGSTUDIO

Fuente: elaboración propia

## 5.2. Módulo de porosidad de Zeiss Inspect X-Ray

El propio programa de inspección de CT empleado en este trabajo, el Zeiss Inspect X-Ray, también ofrece un módulo de análisis de porosidad.

En primer lugar, según se ve en la Figura 42, se debe crear un elemento de defecto de volumen, lo que más tarde permitirá estudiar la porosidad de esos defectos.

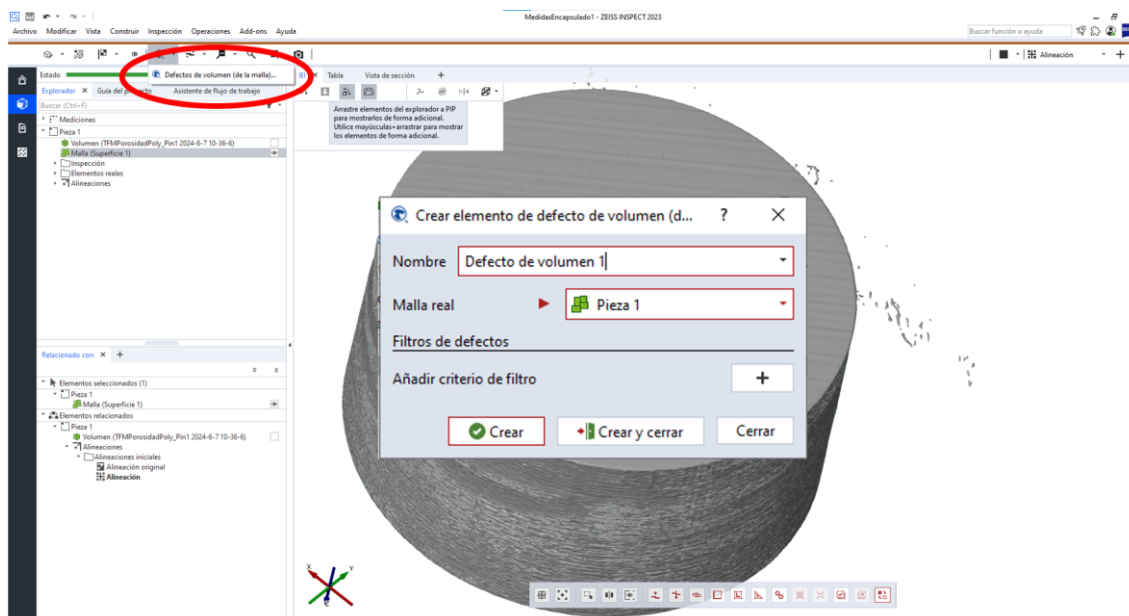


Figura 42: Creación de elemento de defecto de volumen

Fuente: elaboración propia

Una vez creado el defecto, se puede inspeccionar la porosidad del cuerpo, tal y como se muestra en la Figura 43. Se puede ver que el software ha sido capaz de detectar tanto los poros

intencionados, como el *gap* que existe entre el pin y la matriz. Así como los defectos internos del tornillo en el centro del volumen.

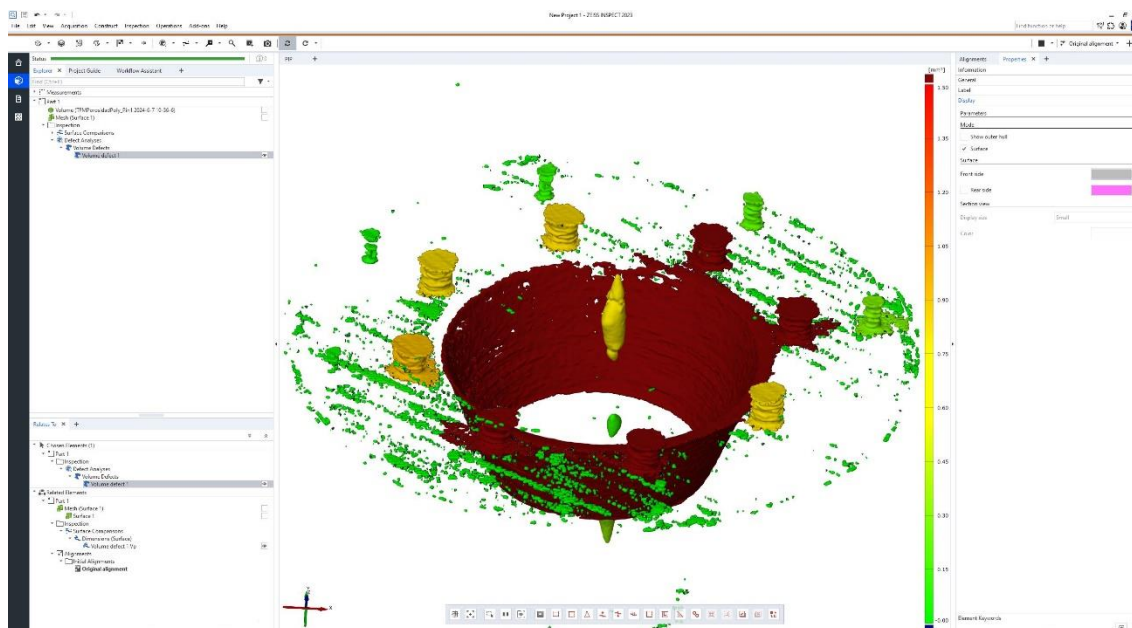


Figura 43: Vista 3D de porosidad en Zeiss Inspect X-Ray

Fuente: elaboración propia

La presencia de este *gap* hace que el estudio de los poros en el programa se vea entorpecido, ya que, como se aprecia en la Figura 43, algunos poros se fusionan con zonas del *gap*, haciendo que el programa lo reconozca todo como un gran poro.

Sin embargo, como se muestra en la Figura 44, al aumentar el tamaño de vóxel de la tomografía se consigue eliminar el *gap* y se obtienen unos poros más idealizados y aislados más fáciles de medir, los cuales el software es capaz de distinguir fácilmente. Esto tiene la ventaja de una medición más cómoda, pero se está sacrificando precisión. Esta situación se explica más en detalle en el punto “6.2. Variación del tamaño de vóxel”.

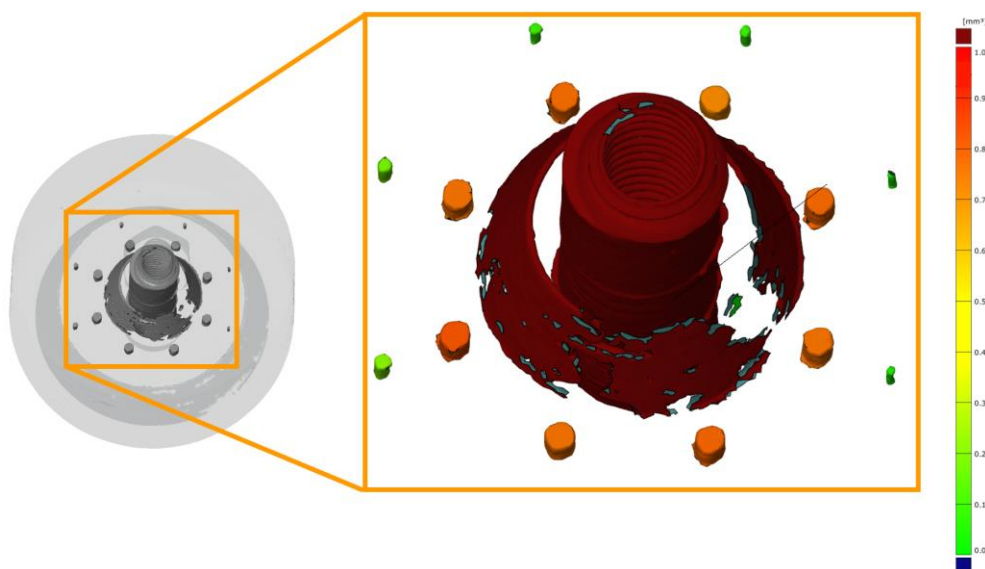


Figura 44: Escala de volumen de poros en Zeiss Inspect X-Ray con tamaño de vóxel  $65 \mu\text{m}$

Fuente: elaboración propia

## 6. Estudio del efecto de los parámetros sobre la capacidad de detección de la tomografía

Todas las mediciones que se han comentado anteriormente en este trabajo se han realizado con un voltaje de 100 kv y un tamaño de vóxel de 34,26  $\mu\text{m}$ . Sin embargo, en este apartado se exponen los resultados que se han obtenido variando estos parámetros.

### 6.1. Variación del voltaje

Se ha realizado la medición de un mismo poro de un mismo pin variando el voltaje del tomógrafo, manteniendo el tamaño de vóxel constante entre mediciones (34  $\mu\text{m}$ ). Debido a que los agujeros más pequeños son marcadamente irregulares debido al proceso de fabricación, se considera que no son los poros adecuados para valorar el impacto del cambio del voltaje. Por ello se ha medido un poro algo más grande y estable, el poro 8 del Pin 2, y se han realizado cinco medidas diferentes. En cada una de ellas también se ha variado la intensidad del tomógrafo al valor recomendado por el software, esto sirve para que las imágenes capturadas sean visibles, ya que en caso de no actualizar la corriente se pueden obtener imágenes sin formas claras, y con ello un volumen 3D deficiente.

A priori, por indicaciones del fabricante del tomógrafo, y por experiencia previa en la tomografía en la universidad, lo aconsejable al ejecutar una nueva tomografía es tener un histograma centrado durante la medición. Esto es debido a motivos como: un mejor contraste, ya que un histograma centrado permite una mejor diferenciación entre diferentes materiales y estructuras dentro de la imagen; reducción de artefactos, ya que, si el histograma no está centrado, es posible que algunos píxeles estén saturados (demasiado brillantes) o subexpuestos (demasiado oscuros), lo que puede introducir artefactos en la imagen. Para el material polimérico que se está estudiando, un histograma centrado se obtiene para un voltaje de 100 kv, que es el empleado en el grueso de las medidas tomadas en este trabajo. En la Figura 45 se muestra la posición de los histogramas durante las diferentes tomografías.

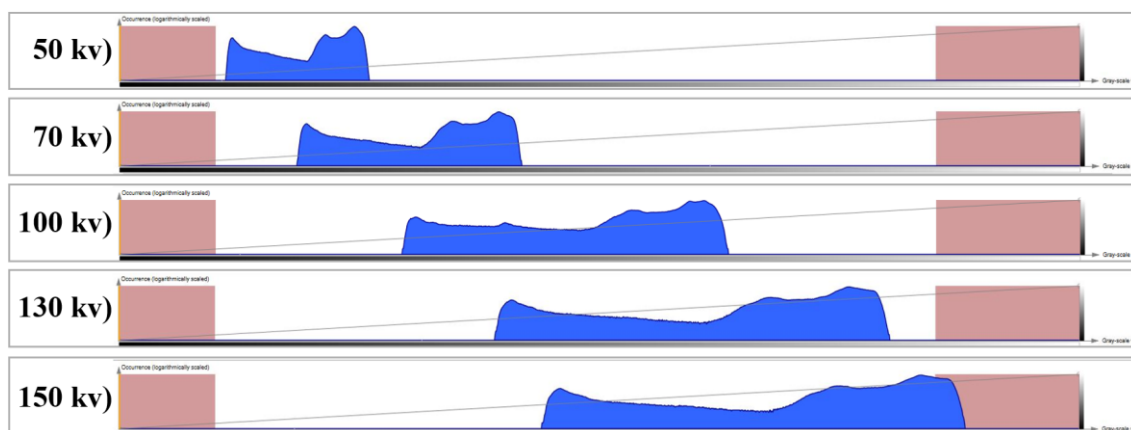


Figura 45: Histogramas de configuración del tomógrafo según voltajes

Fuente: elaboración propia

En la Figura 46 se presenta el aspecto del poro en sección y en volumen. El poro de la imagen (c) se ha tomado con 100 kv, es decir, el valor utilizado en el grueso de este estudio. Mientras que las imágenes (a), (b), (d), y (e) son resultado de tomografías con 50 kv, 70 kv, 130 kv y 150 kv respectivamente.

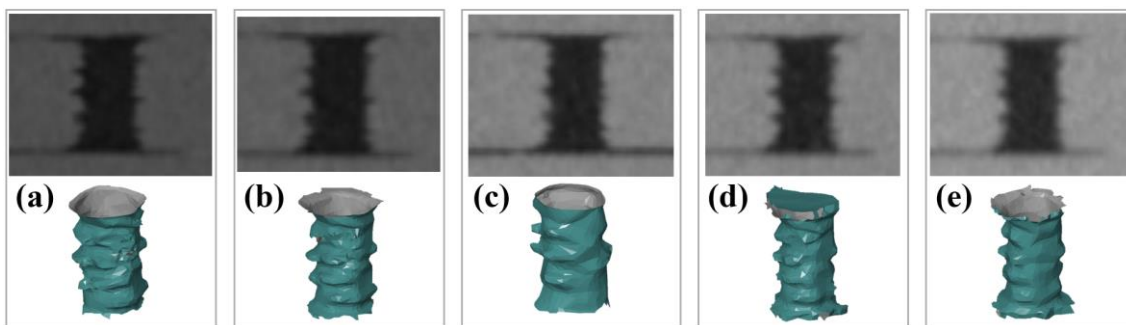


Figura 46: Poro 8 del Pin 2 a 50 kv (a), 70 kv (b), 100 kv (c), 130 kv (d), 150 kv (e)

Fuente: elaboración propia

El aspecto de los poros a simple vista es similar en todos ellos, por lo que se realizan mediciones sobre ellos para ver si existen variaciones cuantificables entre diferentes tomografías a diferente voltaje. En la Tabla 2 se presentan los valores de diámetro y cilindridad o error de forma obtenidos para cada voltaje. Se han tomado medidas con los dos softwares mencionados para tener más datos que comparar, ya que a priori las imágenes no presentan diferencias muy notorias.

Dimensiones Zeiss Inspect X-Ray vs VGSTUDIO				
	Zeiss Inspect X-Ray		VGSTUDIO	
Voltaje (kv)	Ø (µm)	Cilindridad (µm)	Ø (µm)	Cilindridad (µm)
50	530,59	124,35	470,47	109,61
70	523,72	120,99	479,54	73,95
100	527,61	80,80	486,72	109,27
130	514,60	102,25	493,43	71,47
150	515,11	103,29	499,65	104,94

Tabla 2: Dimensiones Zeiss Inspect X-Ray vs VGSTUDIO según voltaje

Fuente: elaboración propia

En la Figura 47 se observa la representación gráfica del diámetro y la cilindridad medidos por medio de los softwares de Zeiss Inspect X-Ray y VGSTUDIO según los diferentes voltajes empleados en las mediciones.

A la vista de la Figura 47, cabe destacar que el diámetro del Zeiss Inspect X-Ray tiene una tendencia descendente y el del VGSTUDIO ascendente. Esta diferencia se debe a que se han utilizado estrategias diferentes de ajuste del cilindro. Mientras que en el VGSTUDIO el usuario prima la geometría e irregularidades interiores del poro, en el Zeiss Inspect X-Ray se tiene en cuenta toda la superficie del poro, tanto los puntos más interiores como los más exteriores de las paredes de este.

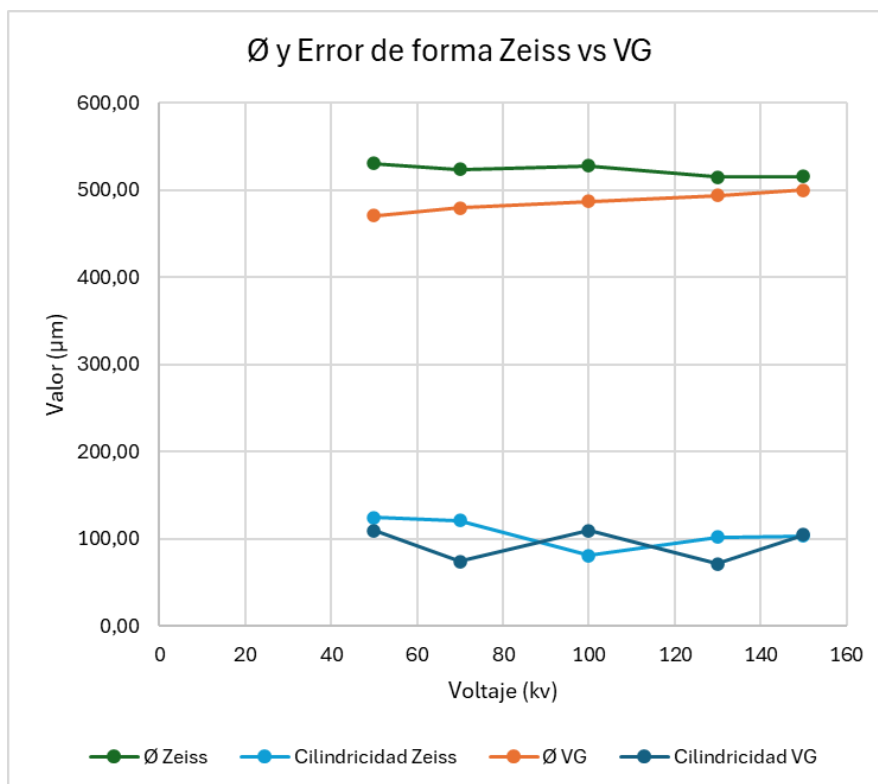


Figura 47: Gráfica diámetro y cilindridad Zeiss Inspect X-Ray vs VGSTUDIO según voltaje

Fuente: elaboración propia

Como se aprecia en la Figura 47, sí que el voltaje parece tener una influencia sobre las mediciones, sin embargo, teniendo en cuenta la magnitud del error de forma o cilindridad que se está percibiendo, la importancia de esta influencia es relativa. Es decir, la tendencia de los diámetros, además de opuesta según el método y programa de medición, tiene una tendencia muy suave (30  $\mu\text{m}$  de variación total en el Zeiss Inspect X-Ray, y 15  $\mu\text{m}$  en el VGSTUDIO). Ello frente a errores de forma de en torno a 100  $\mu\text{m}$ .

Ya que la tendencia de las dimensiones con diferentes voltajes no tiene una variación muy significativa con respecto a los errores de forma, se considera razonable trabajar con el voltaje de 100 kv, el cual mantiene un histograma más equilibrado y centrado, además de seguir la línea de las instrucciones del fabricante del tomógrafo.

## 6.2. Variación del tamaño de vóxel

En este apartado se ha tomografiado el mismo poro del mismo pin para tres tamaños de vóxel diferentes, el de 34  $\mu\text{m}$  que es el que se ha utilizado a lo largo de este trabajo, de 18  $\mu\text{m}$  y de 65  $\mu\text{m}$ , manteniendo en las tres tomografías el voltaje constante (100 kv). Al igual que en el apartado anterior, se ha estudiado el Poro 8 del Pin 2. No se ha probado con tamaños de vóxel más pequeños de 18  $\mu\text{m}$ , puesto que físicamente la pieza no puede acercarse más a la fuente de rayos X, ya que durante el giro de la medición podría colisionar con la fuente, como se puede apreciar en la Figura 48 (a).

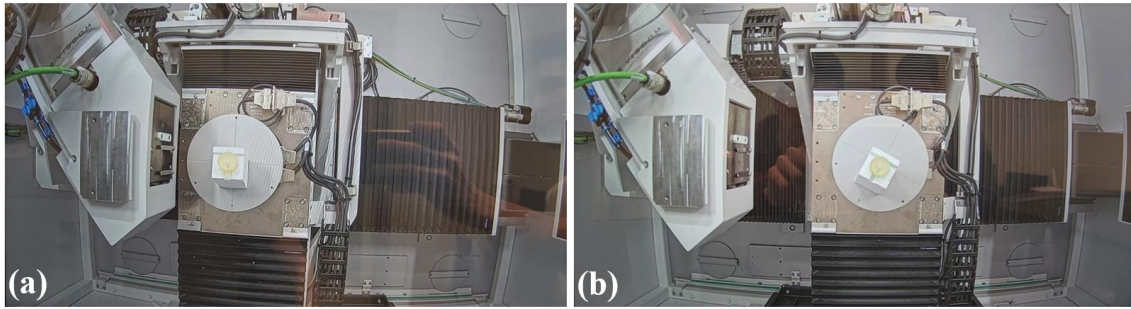


Figura 48: Posición de medición en el tomógrafo para tamaño de vóxel de 18  $\mu\text{m}$  (a) y 34  $\mu\text{m}$  (b)

Fuente: elaboración propia

En la Figura 49 se presentan las secciones y las vistas tridimensionales del Poro 8 del Pin 2 con tamaño de vóxel de 18  $\mu\text{m}$  (a), 34  $\mu\text{m}$  (b) y 65  $\mu\text{m}$  (c). Se puede apreciar que a medida que el tamaño de vóxel aumenta, se pierde precisión en las imágenes. Al igual que si se pierde resolución se suavizan los bordes y las formas obtenidas, como era de esperar.

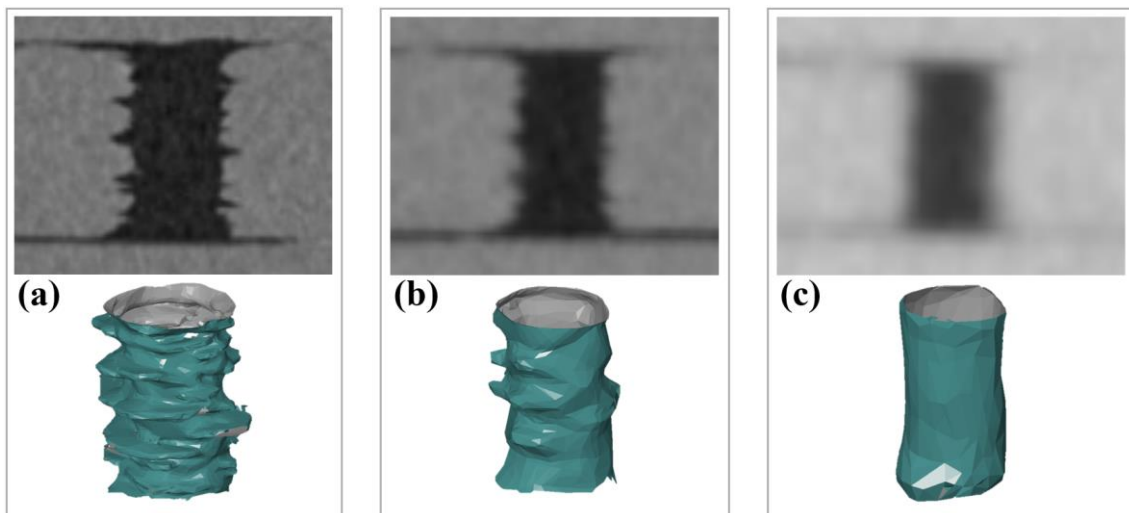


Figura 49: Poro 8 del Pin 2 con tamaño de vóxel de 18  $\mu\text{m}$  (a), 34  $\mu\text{m}$  (b) y 65  $\mu\text{m}$  (c)

Fuente: elaboración propia

Aunque a simple vista las diferencias entre mediciones ya son notables, se realizan mediciones sobre los poros obtenidos. En la Tabla 3 se presentan los valores de diámetro y error de forma obtenidos para cada tamaño de vóxel.

Dimensiones Zeiss Inspect X-Ray		
	Zeiss Inspect X-Ray	
Tamaño de vóxel ( $\mu\text{m}$ )	$\text{\O}$ ( $\mu\text{m}$ )	Cilindricidad ( $\mu\text{m}$ )
18	549,65	200,73
34	527,61	80,80
65	502,72	167,89

Tabla 3: Dimensiones Zeiss Inspect X-Ray según tamaño de vóxel

Fuente: elaboración propia

En la Figura 50 se observa la representación gráfica del diámetro y la cilindruidad medidos por medio de Zeiss Inspect X-Ray según los diferentes tamaños de vóxel empleados en las mediciones.

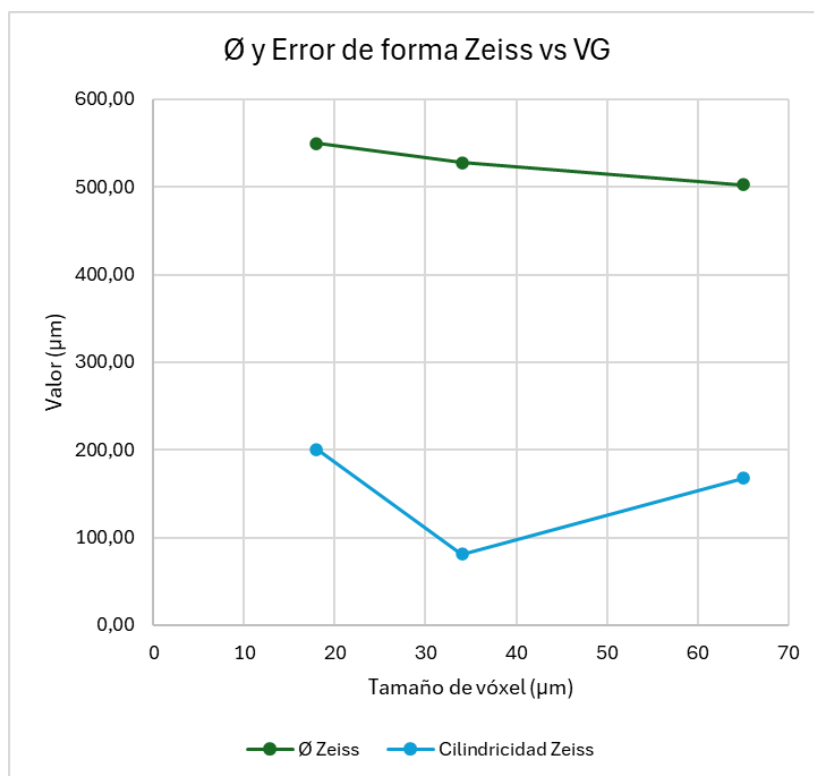


Figura 50: Gráfica diámetro y cilindridad Zeiss Inspect X-Ray según tamaño de vóxel

Fuente: elaboración propia

Según se ve en la Figura 50, parece haber una relación entre el tamaño de vóxel y los diámetros obtenidos. Sin embargo, la variación de los datos es de unos 50 µm frente a errores de forma de 100 a 200 µm, por lo que se considera que el tamaño de vóxel de 34 µm (tamaño empleado en este trabajo) es un valor razonable, que proporciona el menor de los errores de forma y conserva gran parte de los detalles del poro real.

Sin embargo, no es despreciable que las dimensiones de poro obtenidas con tamaño de vóxel mayor (65 µm) son similares a las obtenidas anteriormente. Por ello, esta podría ser otra opción de análisis, aunque sacrificando algo de precisión en la reconstrucción del poro. Esto conlleva como ventajas la obtención de unos poros con menos ruido y sin la existencia del *gap* mencionado anteriormente, como se puede ver en la Figura 44. Además de que la tomografía es más rápida, pues el volumen que se escanea es menor que en los tamaños de vóxel anteriores. Sin olvidar que utilizando tamaños de vóxel más grandes se está perdiendo precisión en las formas obtenidas, ya que los poros aparecen idealizados de este modo.

## 7. Conclusiones y trabajo a futuro

Los poros más pequeños del prototipo, aquellos por debajo de 400  $\mu\text{m}$ , por las propias dificultades del proceso de fabricación, tienen un proceso de medición poco repetible, ya que son cilindros muy irregulares. Por ese mismo motivo, se puede afirmar que el proceso de fabricación empleado en este trabajo interfiere con la capacidad de análisis de detección de porosidad del tomógrafo.

Se ha observado que el microscopio solo puede visualizar la pared más interna del agujero, mientras que la tomografía es capaz de ver todas las cavidades e imperfecciones dentro del poro. Por lo tanto, al medir diámetros, el microscopio obtiene valores menores que la tomografía.

La existencia de un *gap* entre los componentes del prototipo aumenta la altura de los poros en la tomografía y genera ruido en la detección de defectos internos de la pieza cuando se analiza con software especializado.

Se ha comprobado que, al tomografiar un defecto encerrado, las dimensiones de este contienen más error que si se tomografiase el mismo defecto al descubierto, como era de esperar.

El error de cilindridad presente en las medidas se debe en gran parte a la fabricación aditiva del patrón, ya que este método no proporciona el mejor acabado en los defectos interiores.

En los módulos especializados para el análisis de porosidad de programas como el Zeiss Inspect X-Ray o el VGSTUDIO existe la opción de detectar automáticamente defectos internos. Si bien estos programas permiten una detección rápida de los poros, se ha visto que la caracterización individualizada de ellos sigue siendo un proceso manual como el que se ha desempeñado en este trabajo. Además, los poros reales de la pieza se mezclan en ocasiones con los poros artificiales que se quieren estudiar.

Se ha observado que el voltaje influye en las mediciones. Sin embargo, dado el tamaño del error de forma detectado, la importancia de esta influencia es relativa. Por ello, se ha decidido trabajar con el voltaje que mantiene un histograma más equilibrado y centrado, además de seguir las instrucciones del fabricante del tomógrafo.

Parece haber una relación entre el tamaño del vóxel y los diámetros obtenidos. No obstante, la variación en los diámetros es significativamente menor que los errores de forma observados. Por lo tanto, se considera que el tamaño de vóxel empleado en este trabajo es adecuado, ya que minimiza los errores de forma y conserva gran parte de los detalles del poro real, sin ser excesivamente detallado. Sin embargo, el utilizar tamaños de vóxel más grandes ha resultado ser útil para el análisis posterior de los datos, ya que de este modo los poros salen idealizados, siempre y cuando no importe perder algo de precisión en las medidas.

Realmente se ve que hay un problema en cómo analizar correctamente este tipo de situaciones, ya que los poros son muy irregulares y según cómo escoja el usuario los puntos de medición en el poro, los datos obtenidos pueden variar. Ver “Anexo C: Diferencias de procedimiento en el análisis de los datos”. Por ello se ve necesaria más investigación sobre la estandarización del procedimiento de análisis de las dimensiones en este tipo de sistemas.

Para mejoras futuras del prototipo, se tendría que ser capaz de obtener agujeros mejor logrados y más pequeños. Esto quizás se podría conseguir con el uso de otros materiales y otros procesos de fabricación que permitan mayor precisión de ejecución. En posteriores iteraciones del prototipo, se aconseja probar con materiales como el aluminio, si bien la dificultad que se presenta en materiales metálicos es la utilización de brocas de tamaño muy reducido en la mecanización de los poros.

Futuros avances de la pieza de referencia deberían buscar eliminar el *gap* existente entre componentes, ello se podría conseguir por medio de una nueva geometría interior que tienda a eliminar ese espacio, o mediante nuevos métodos de ajuste más precisos entre componentes.

De cara a una posterior mejora del prototipo de ensayo, sería conveniente hacer que este no tenga una simetría completa de revolución en el montaje. Para poder localizar más fácilmente la posición de la pieza de manera rápida y poder alinearla más sencillamente en los programas 3D.

## Bibliografía

- [1] H. Villarraga-Gómez, E. L. Herazo y S. T. Smith, «X-ray computed tomography: from medical imaging to dimensional metrology,» *www.elsevier.com/locate/precision*, 2019.
- [2] W. Messtechnik, *X-ray Tomography in Industrial Metrology*, 2018.
- [3] NSI, «4nsi.com,» [En línea]. Available: <https://4nsi.com/an-introduction-to-ct-scan-image-artifacts/>. [Último acceso: 16 06 2024].
- [4] P. Hermanek y S. Carmignato, «Reference object for evaluating the accuracy of porosity measurements by X-ray computed tomography,» *ELSEVIER*, 2016.
- [5] Stratasys, «support.stratasys.com,» [En línea]. Available: <https://support.stratasys.com/es/printers/polyjet-legacy/eden350v-500v>. [Último acceso: 16 06 2024].
- [6] Stratasys, «www.stratasys.com,» [En línea]. Available: <https://www.stratasys.com/es/materials/materials-catalog/polyjet-materials/rgd720/>. [Último acceso: 16 06 2024].
- [7] Zeiss, «zeiss.es,» [En línea]. Available: <https://www.zeiss.es/metrologia/productos/sistemas/tomografia-computarizada/metrotom.html>. [Último acceso: 16 06 2024].
- [8] Alicona, «Bruker alicona,» [En línea]. Available: <https://www.alicon.com/en/products/infinitefocussl>. [Último acceso: 15 abril 2024].
- [9] P. Hermanek y S. Carmignato, «Porosity measurements by X-ray computed tomography: Accuracy evaluation using a calibrated object,» *ELSEVIER*, 2017.
- [10] P. Hermanek, F. Zanini y S. Carmignato, «Traceable Porosity Measurements in Industrial Components Using X-Ray Computed Tomography,» *ASME*, 2019.
- [11] Y. C. e. al, «Development of a modular system to provide confidence in porosity analysis of additively manufactured components using x-ray computed tomography,» *IOP*, 2024.
- [12] M. Praniewicz, J. Fox y C. Saldana, «Toward traceable XCT measurement of AM lattice structures: Uncertainty in calibrated reference object measurement,» *ELSEVIER*, 2022.
- [13] Zeiss, «www.handsonmetrology.com,» [En línea]. Available: <https://www.handsonmetrology.com/es/products/software/#zeiss-inspect>. [Último acceso: 23 05 2024].
- [14] V. Graphics, «www.volumegraphics.com,» [En línea]. Available: <https://www.volumegraphics.com/en/products/vgstudio.html>. [Último acceso: 19 06 2024].

## **ANEXOS**

## Anexo A: Proceso de diseño de la pieza patrón

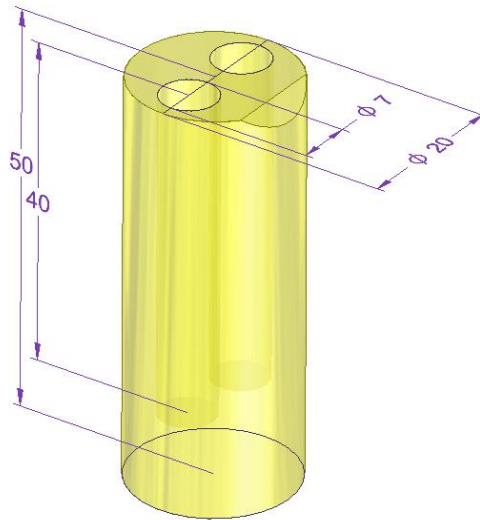
Para el diseño del patrón se han realizado varias propuestas, a cada cual ajustándose más a las necesidades requeridas para los ensayos posteriores.

Todos los diseños en tres dimensiones del presente trabajo se han realizado con *Solid Edge 2020*. Todas las dimensiones están en mm.

La idea es generar defectos artificiales en la pieza, sin saber a priori hasta qué tamaño de defecto se va a conseguir llegar por los métodos de AM por los cuales se van a construir las piezas.

### A.1. Prototipo I

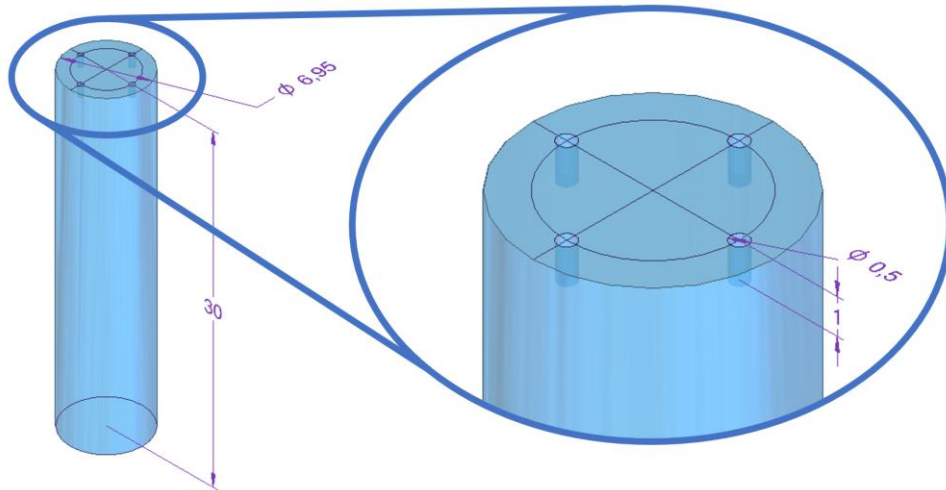
El primer prototipo constaba únicamente de una matriz encargada de recoger dos pines con poros en la superficie de una de sus caras. Utilizando como idea el objeto de calibración propuesto en otro estudio de porosidad en 2017 [9]. Este primer prototipo tenía un rebaje encargado de proporcionar asimetría a la pieza. De este modo, mirando la tomografía, se podría saber por qué lado se está observando de manera rápida y efectiva. (Ver Figura 51)



*Figura 51: Matriz prototipo I*

*Fuente: elaboración propia*

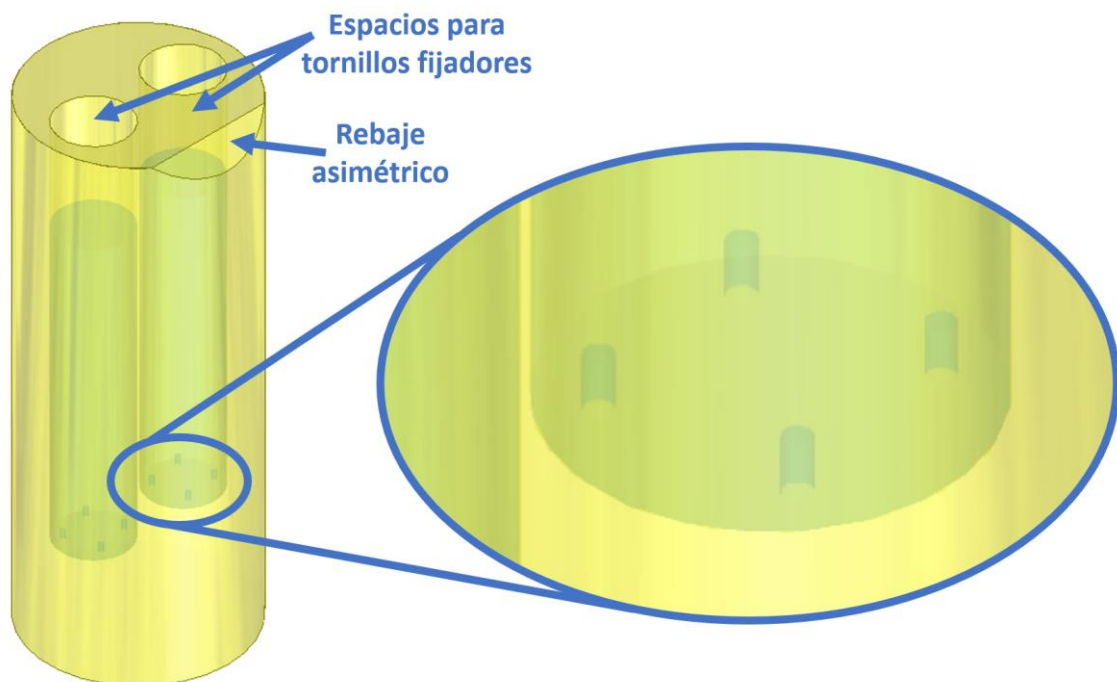
Se dejó una holgura de 0,05 mm entre pin y matriz, para evitar interferencias entre las piezas. Cada pin poseía 4 defectos artificiales en su superficie, a modo de porosidad.



*Figura 52: Pin prototipo I*

*Fuente: elaboración propia*

A la hora de introducir los pines en sus posiciones, los poros debían quedar en la cara inferior, para que se encontraran entre el mismo material por ambos lados, tal y como le sucedería a un poro real. Una vez insertados los pines en sus respectivos huecos, unos tornillos serían los encargados de fijarlos bien en su sitio. Para evitar posibles movimientos de pin durante o entre las mediciones.



*Figura 53: Ensamblaje prototipo I*

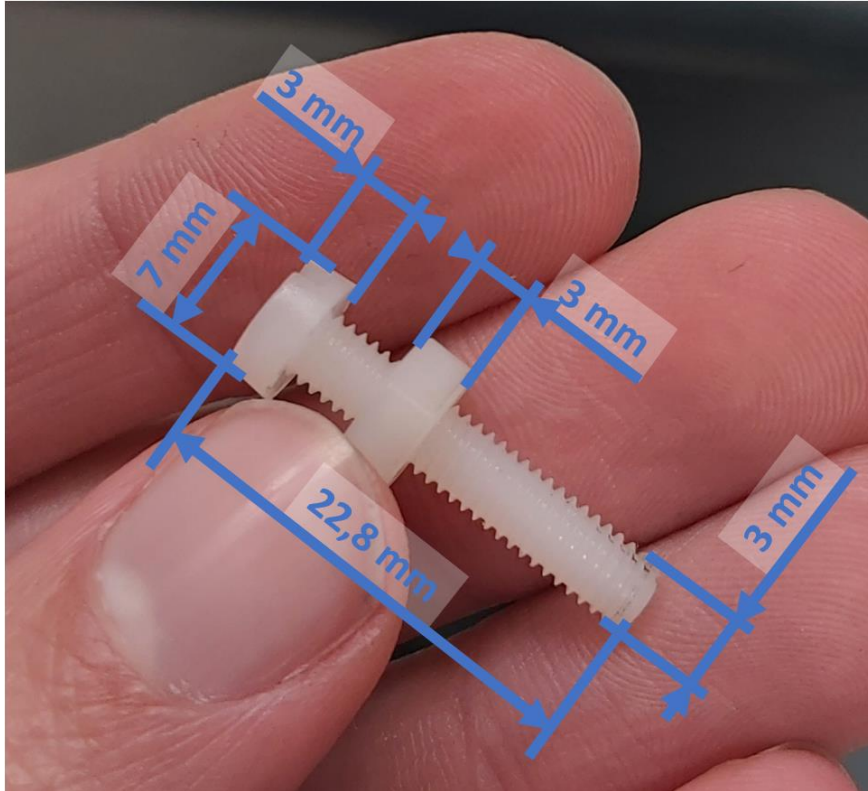
*Fuente: elaboración propia*

Sin embargo, este modelo presentaba diferentes limitaciones:

- El proceso de fabricación de los poros (AM) requería que estos fueran pasantes.
- El número de poros presente en cada pin es muy limitado debido a la poca superficie donde estos se ubican.

## A.2. Prototipo II

En la segunda iteración de la pieza patrón, se optó por un diseño más compacto que ofreciera la posibilidad de incluir más poros en la superficie del pin. Haciendo estos agujeros pasantes, para lograr una mejor ejecución por medio de la fabricación aditiva. Estando en este caso condicionado el diseño por el tamaño del tornillo que se va a utilizar para fijar los componentes.

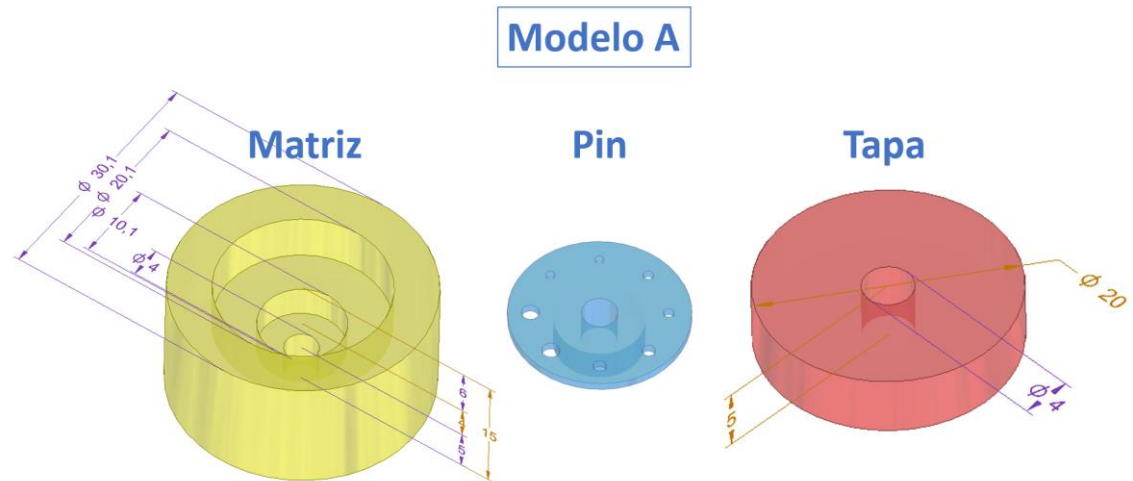


*Figura 54: Dimensiones del tornillo con tuerca*

*Fuente: elaboración propia*

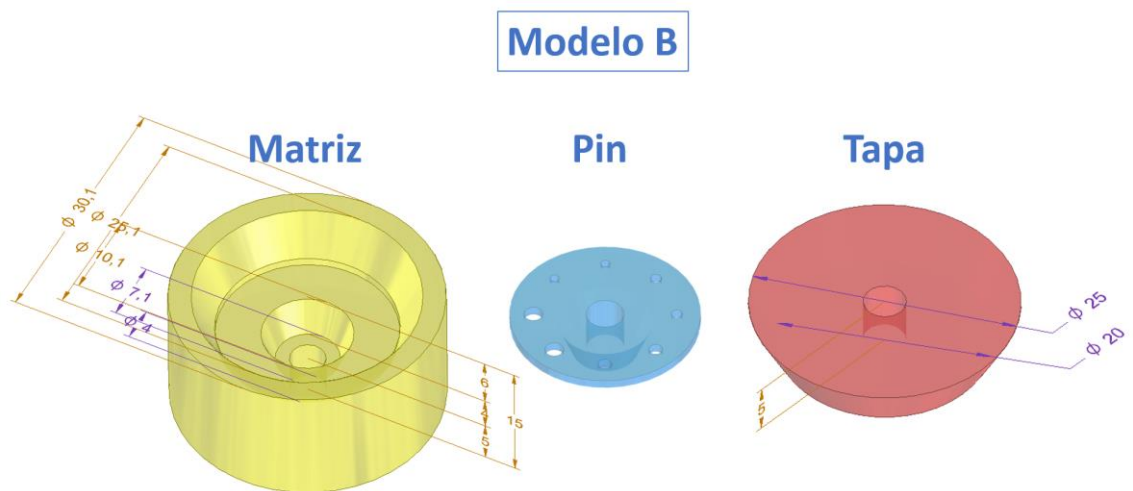
La idea general del patrón consiste en una matriz, que recoge en su interior un cuerpo con la porosidad generada artificialmente que se quiere medir, y una tapa que encierre el cuerpo, conteniendo así los poros como defectos internos.

En el segundo diseño, se establecieron dos variantes del patrón, que, aunque seguían el mismo principio, tenían claras diferencias geométricas. Uno de ellos optaba por un diseño más plano (Modelo A), mientras que el otro apostaba por ángulos que permitieran a los diferentes componentes autocentrarse de alguna manera dentro de la matriz (Modelo B).



*Figura 55: Prototipo II Modelo A*

*Fuente: elaboración propia*



*Figura 56: Prototipo II Modelo B*

*Fuente: elaboración propia*

En ambos modelos los agujeros del pin tienen las mismas dimensiones. Están dimensionados algo mayores que los que se quieren conseguir finalmente. Pues este prototipo se imprimió con tecnología FFF (*Fused Filament Fabrication*), y las tolerancias que se pueden conseguir son mucho mayores que por medio del uso de la PolyJet que finalmente se utilizaría.

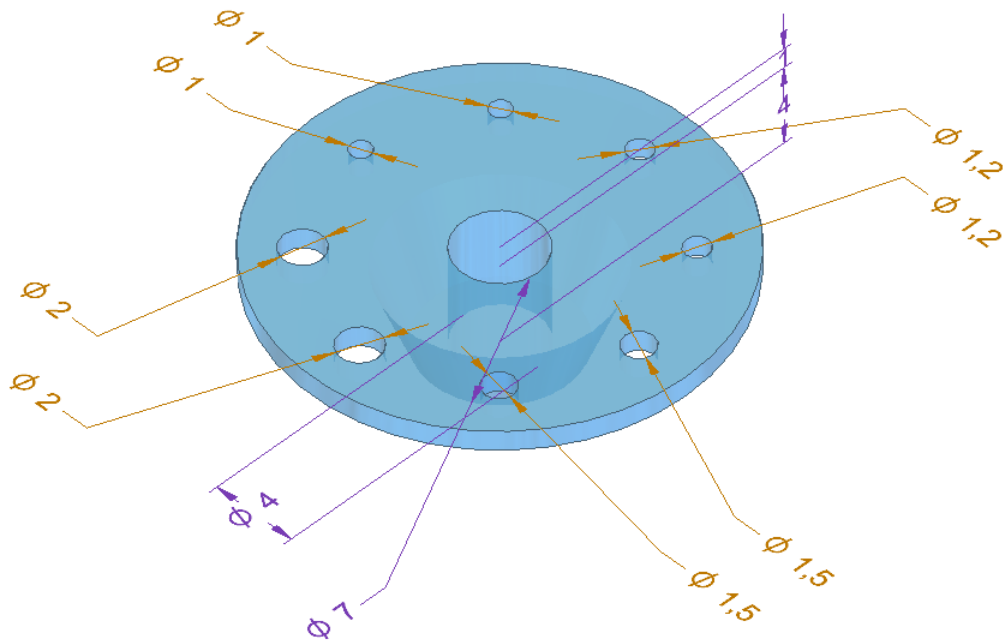


Figura 57: Detalle pin Modelo B

Fuente: elaboración propia

Se imprimió las muestras de ambos modelos, como se muestra a continuación. En la Figura 58 se puede ver que la precisión de la FFF no es lo suficientemente exacta, por lo que los cuerpos no encajan como se podría esperar según diseño.



Figura 58: Impresiones prototipo II

Fuente: elaboración propia

Se realizó una tomografía del Modelo B a modo de comprobación para ver en qué punto el pin hacía contacto con el interior de la matriz. Ver Figura 59.



*Figura 59: Tomografía del prototipo II Modelo B*

*Fuente: elaboración propia*

Si bien la posición no es la correcta, pues la cara inferior del pin no está en contacto con la matriz, el pin consigue entrar en parte dentro de esta. Mientras que en el Modelo A, el pin no se podía introducir en el cuerpo en absoluto.

Por lo anterior, finalmente se decidió seguir adelante con el Modelo B, pues la capacidad de autocentrado de este es algo que el Modelo A no poseía.

### **A.3. Prototipo III**

En la siguiente versión se introdujeron los siguientes cambios:

- Se agrandó el diámetro interior de los componentes que alberga el tornillo, pasando de 4 mm a 5 mm,
- Se ha incrementado la holgura entre matriz y elementos interiores. Se pasó de 0,05 mm a 0,1 mm.
- Se redistribuyeron los agujeros, haciéndose dos pines (pin A y pin B).

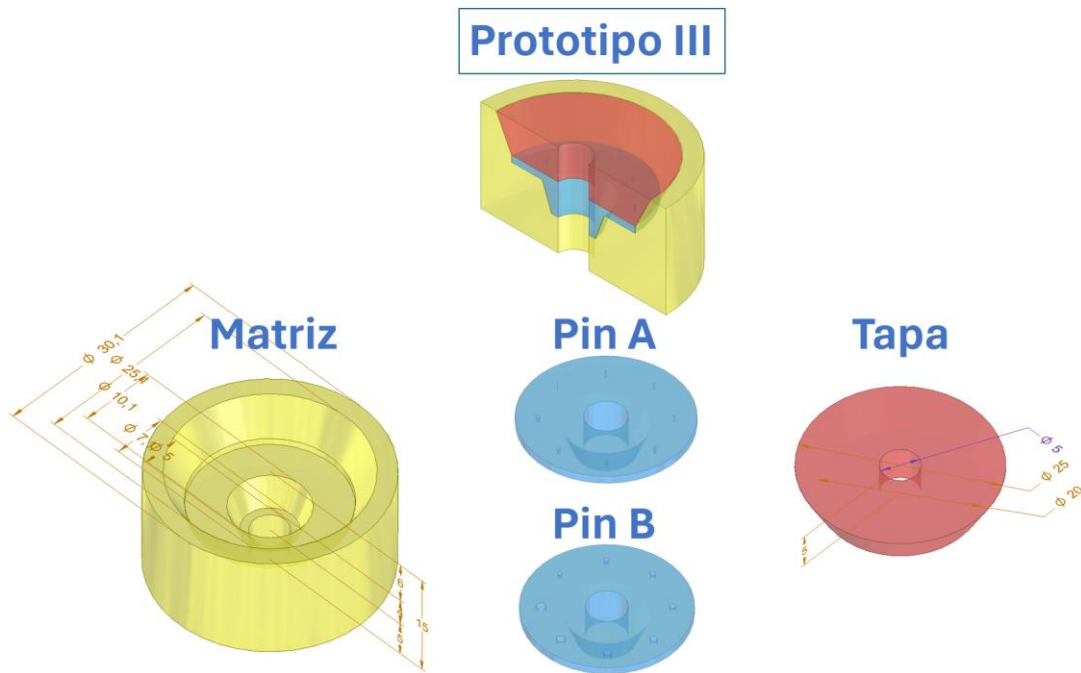


Figura 60: Prototipo III

Fuente: elaboración propia

Los diámetros de los poros se van incrementando gradualmente. Para poder comparar posteriormente defectos de diferentes tamaños en la tomografía, y porque a priori no se conocía hasta qué tamaño se podrían imprimir los agujeros con la impresora PolyJet.

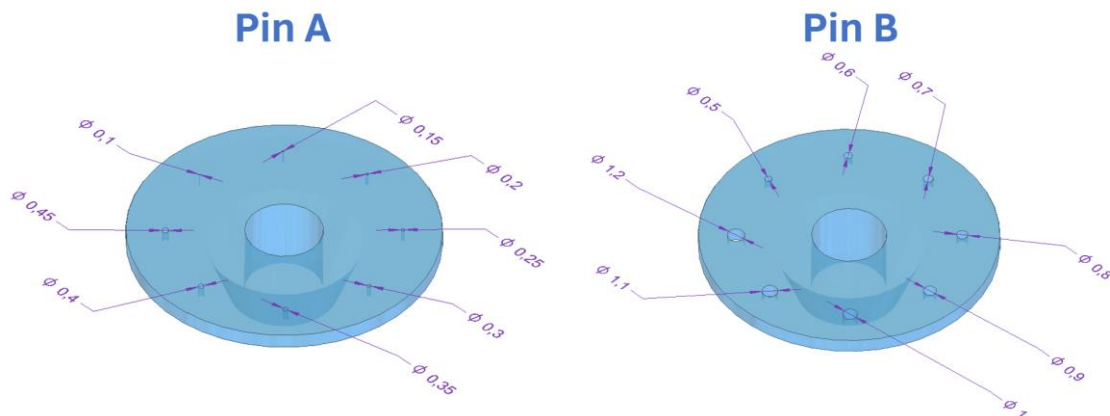
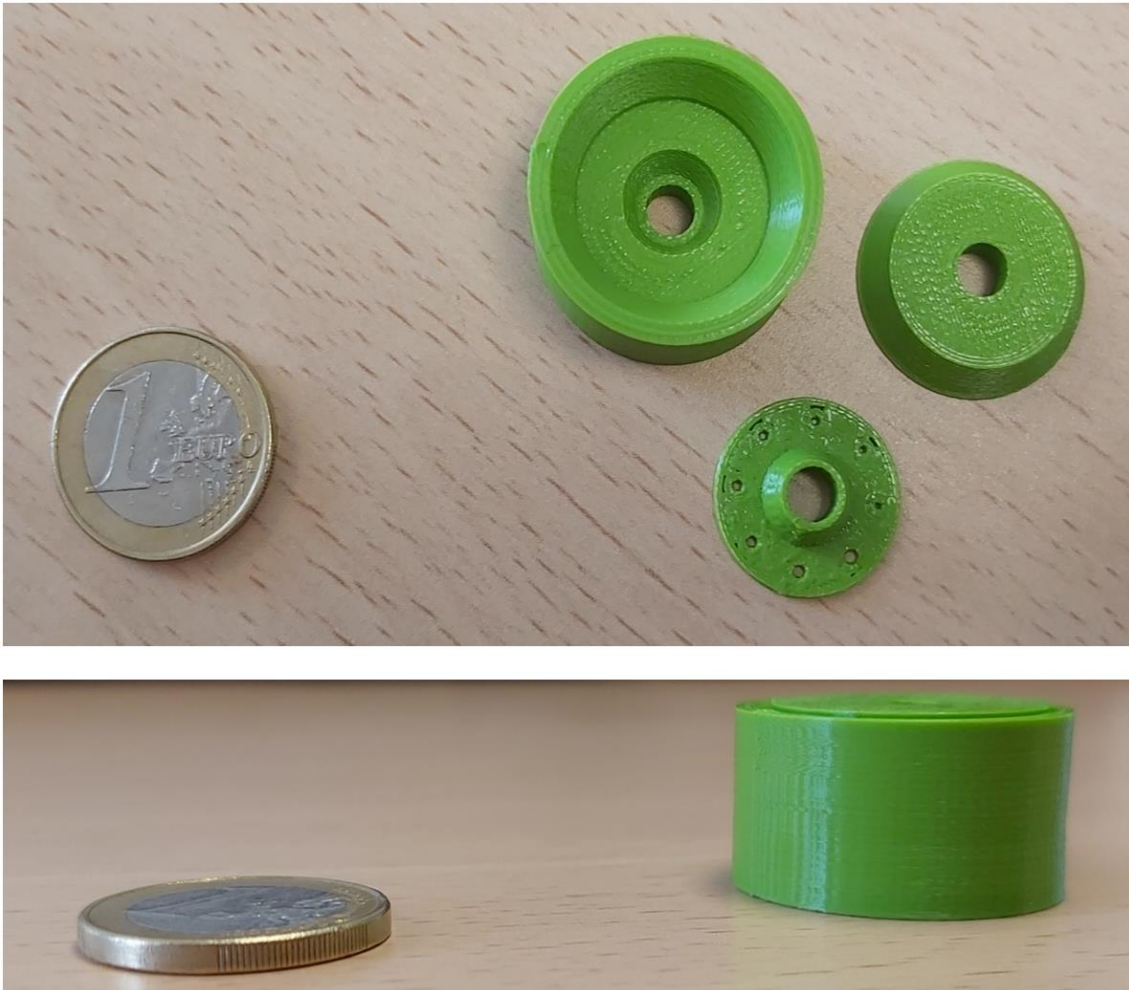


Figura 61: Detalles de los pines A y B, prototipo III

Fuente: elaboración propia

Se imprimió por medio de FFF, a modo de prueba preliminar, una muestra del Pin B de este prototipo pero con una adaptación de las dimensiones (factor de corrección de agujeros) para que los agujeros resultasen bien escalados por medio de FFF, para que los elementos encajaran mejor que en el caso anterior.



*Figura 62: Impresiones prototipo III con FFF*

*Fuente: elaboración propia*

Sobre este prototipo, sobre el pin B en concreto, se realizaron varias mediciones con el microscopio, para poder ver más en detalle la formación de los agujeros que simulan ser poros.

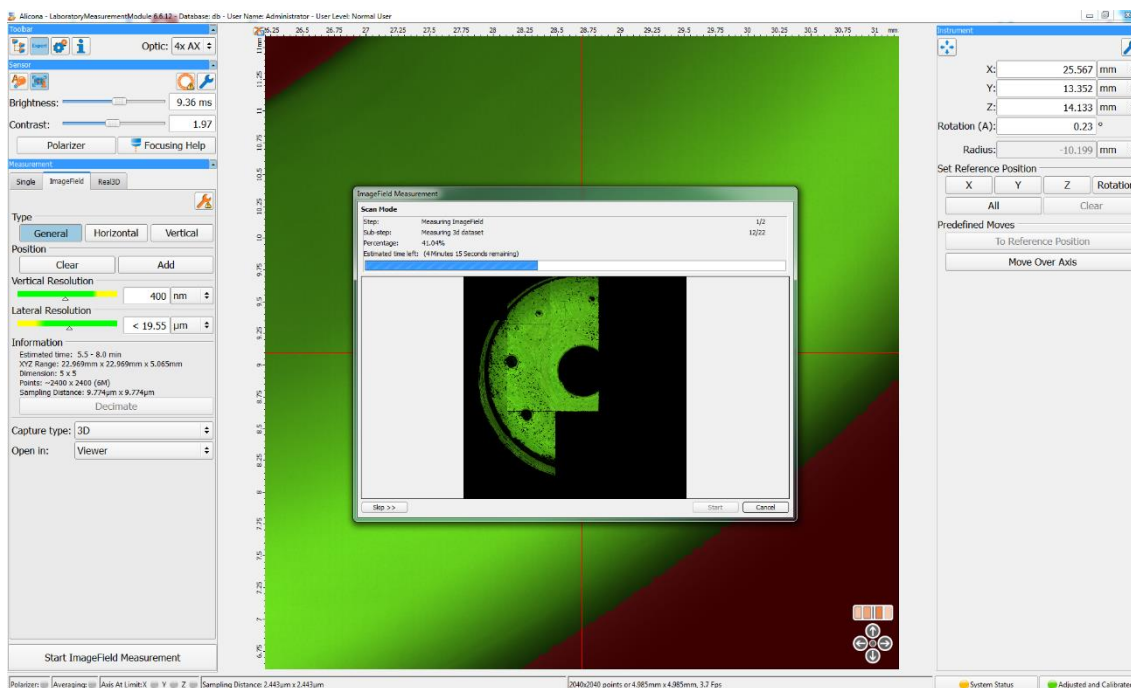


Figura 63: Microscopio Alicona operando

Fuente: elaboración propia

Se observó que en los agujeros más pequeños el fondo no se alcanzaba a ver. Esto es debido a que en los orificios más pequeños la luz no es capaz de entrar, aún tratando de saturar la iluminación y exposición del mismo para que pudiera entrar completamente. En la Figura 64 se observa que para los agujeros de diámetro inferior a 0,9 mm no se obtienen puntos del fondo en el archivo STL que genera el microscopio.

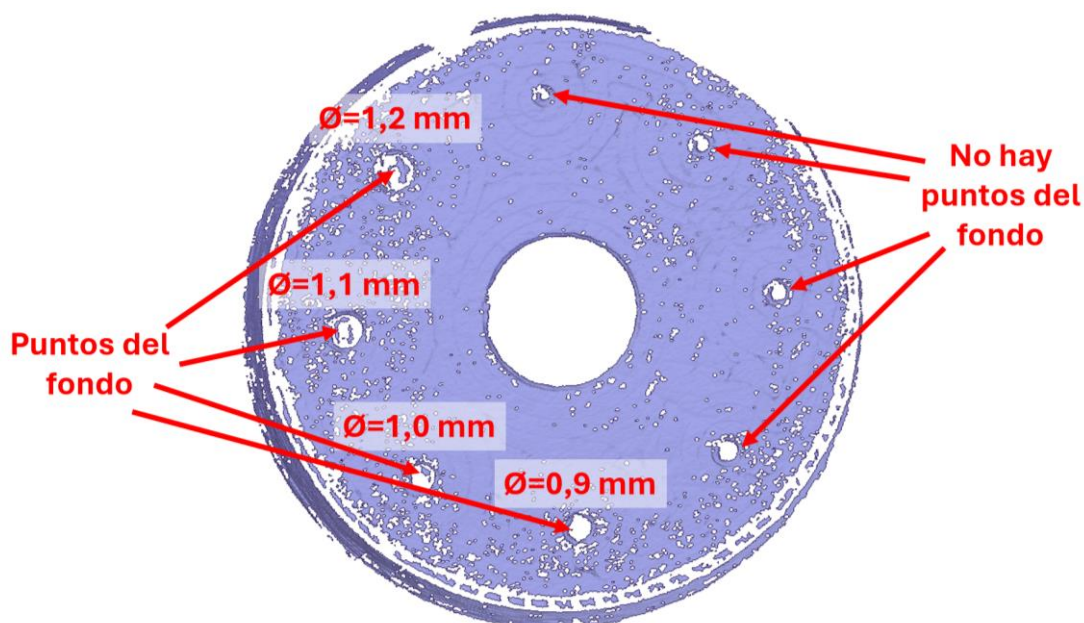
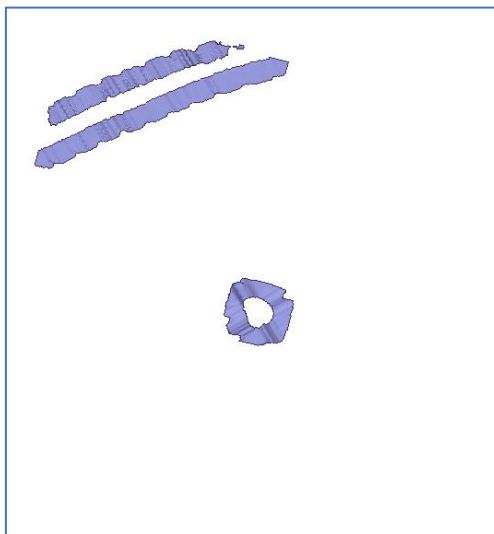


Figura 64: Archivo STL del prototipo III

Fuente: elaboración propia

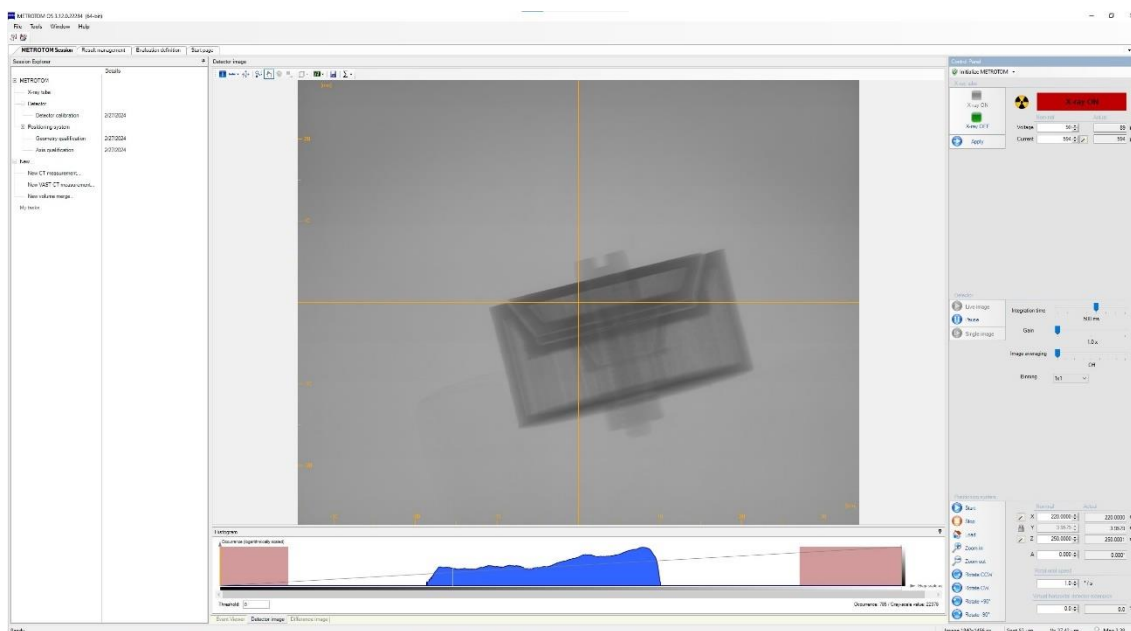
En la Figura 65, se puede ver uno de los agujeros más pequeños, analizado con un alto nivel de saturación. Por ello no se ven las superficies, ya que la luz reflejada hace que se sature en exceso el detector del microscopio. Y a pesar de ello, tampoco se consigue ver el fondo del orificio.



*Figura 65: Orificio pequeño saturado*

*Fuente: elaboración propia*

También se tomografió la pieza para ver su comportamiento interior.



*Figura 66: Interfaz de Metrotom OS durante tomografía*

*Fuente: elaboración propia*

En la Figura 67 se puede ver un corte intermedio del prototipo montado. El software de Zeiss Inspect X-Ray permite superponer la radiografía puntual sobre la sección, lo cual ayuda a tener una mejor percepción de en qué parte nos encontramos. Además, en esta radiografía se identifica fácilmente uno de los agujeros del pin, que al estar obstruido por encima y por debajo, adquiere la forma buscada de un poro artificial.



*Figura 67: Sección intermedia de la pieza montada y poro interior*

*Fuente: elaboración propia*

Como se ve en la Figura 68, la tomografía también permite identificar inclusiones de material no deseadas. En este caso se trata de una inclusión de alguna partícula que presumiblemente se depositaría en la pieza durante el proceso de impresión.

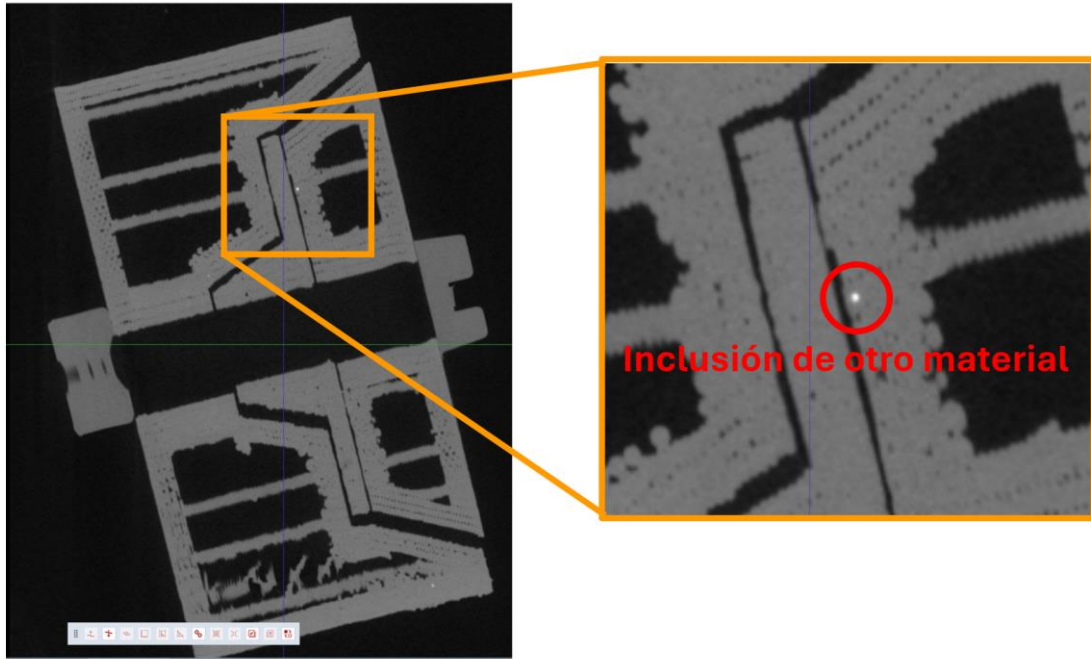


Figura 68: Inclusión de otro material en la pieza

Fuente: elaboración propia

#### A.4. Prototipo final

A la luz de los resultados de la versión anterior, donde se vio que el agujero de 0,9 mm es el más pequeño cuyo fondo se puede caracterizar mediante microscopía. Se ha optado por incorporar agujeros complementarios para todos aquellos cuyo diámetro es menor de 0,9 mm. Así se puede observar la profundidad del agujero en un punto muy cercano al mismo para todos aquellos agujeros en los que no se podía por sus dimensiones.

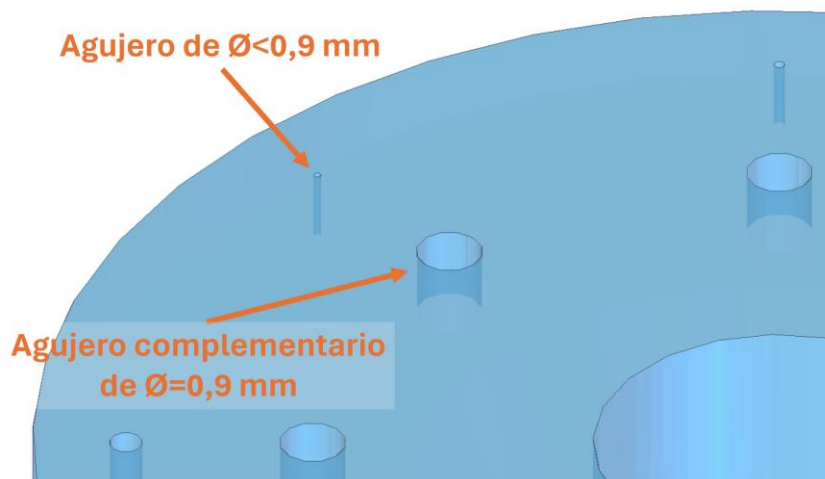


Figura 69: Agujeros complementarios, prototipo final

Fuente: elaboración propia

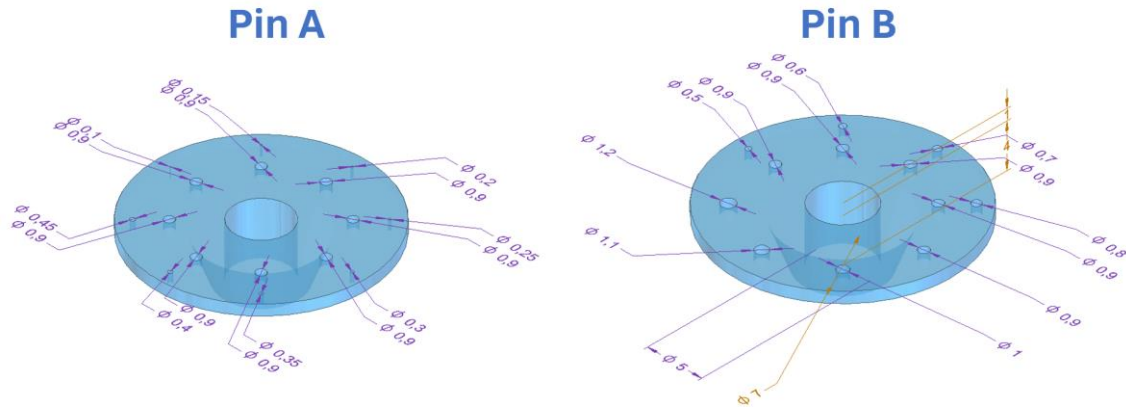


Figura 70: Detalles de los pines A y B, prototipo final

Fuente: elaboración propia

Estas piezas se han impreso con la máquina Eden 350V, pues es el modelo final y se ha querido imprimir con mayor calidad para conseguir mayor resolución en los poros artificiales. Se han impreso tres pines A (pines 1, 2 y 3) y tres pines B (pines 4, 5 y 6) para tener repuestos ya impresos en caso de necesitarse.

Las piezas impresas con esta máquina requieren de ser tratadas una vez impresas. Ya que hay que retirar el material de soporte, que rellena todos los espacios negativos de la pieza. Para esto se aplica agua a presión en las piezas, desprendiendo el material de soporte, el cual tiene la misma densidad que el material original en seco, pero menor densidad que el material de la pieza en mojado. Este material de soporte tiene las mismas características que el material normal de la pieza en seco, y en una tomografía es imposible diferenciar entre ambos materiales. Sin embargo, al mojarse, sus propiedades cambian, ya que se vuelve más viscoso y parece desprenderse parcialmente, como se llega a observar en la Figura 71.

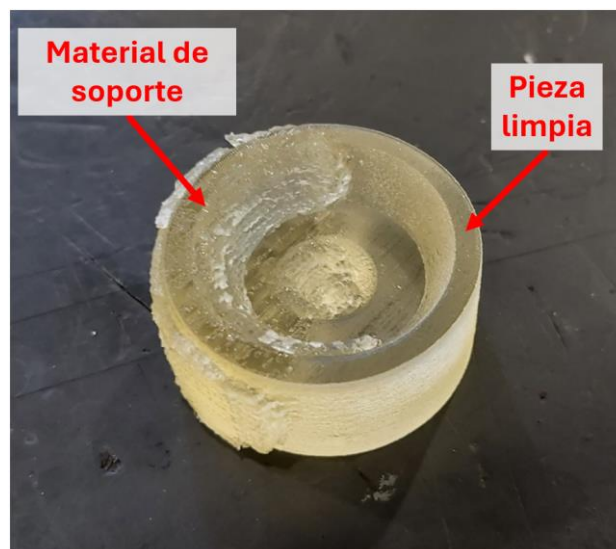


Figura 71: Pieza con material de soporte

Fuente: elaboración propia

El proceso de limpieza se ha llevado a cabo con una máquina de agua a presión que se opera cerrada para evitar salpicaduras fuera de la zona de trabajo.



*Figura 72: Proceso de limpieza*

*Fuente: elaboración propia*

Las piezas obtenidas tienen el aspecto que se muestra en la Figura 73.



*Figura 73: Impresión de prototipo final con Eden 350V*

*Fuente: elaboración propia*

Se ha tomografiado el pin número 1 (Pin A) para ver la forma de los agujeros, como se muestra a continuación. Se puede apreciar que solamente los 4 agujeros más grandes son realmente pasantes (0,45 mm, 0,40 mm, 0,35 mm y 0,30 mm), mientras que el resto, aunque tienen forma, no llegan a ser pasantes en la pieza (0,25 mm, 0,20 mm, 0,15 mm y 0,10 mm). Esto puede ser debido a que o el agujero no se ha formado completamente durante el proceso de impresión, o a que queda material de soporte atrapado en la sección media del agujero, lo que es más probable.

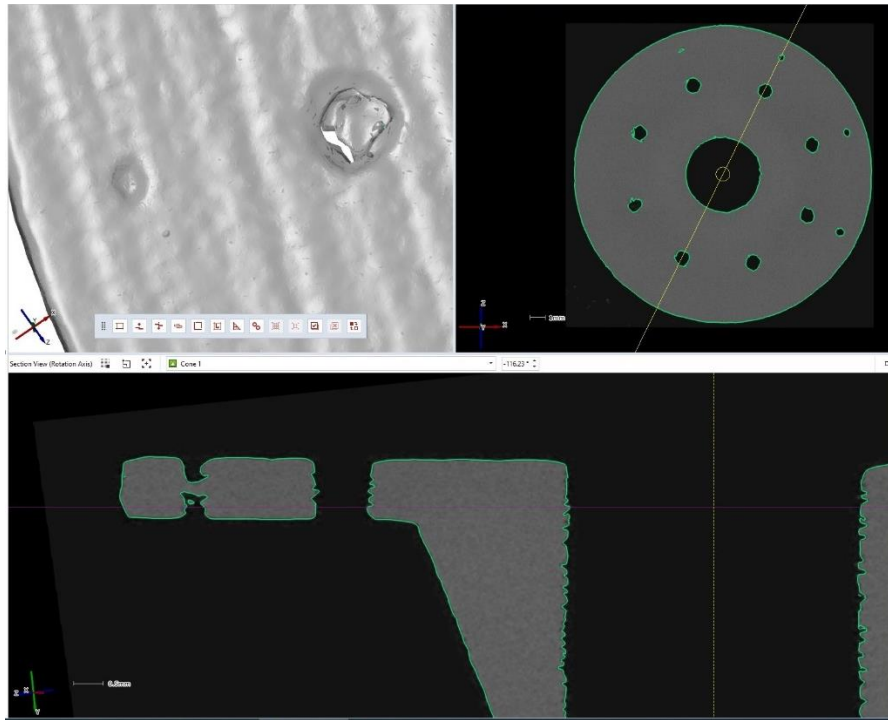


Figura 74: Tomografía Prototipo final Pin A

Fuente: elaboración propia

### A.5. Utillaje para microscopio

Se ha diseñado un utillaje que permite anclar la pieza a la mesa de mediciones del microscopio Alicona Infinite Focus SL, para evitar movimientos de la misma durante las mediciones. El utillaje consta de cuatro orificios en las esquinas que permiten a los tornillos fijar el cuerpo a la mesa de mediciones. En el centro hay espacio para el tornillo de la pieza a medir, cuya función en este caso será la de unir la pieza sin tapa al utillaje. Asimismo, un espacio redondeado en la parte inferior del utillaje permite enroscar el tornillo por debajo.

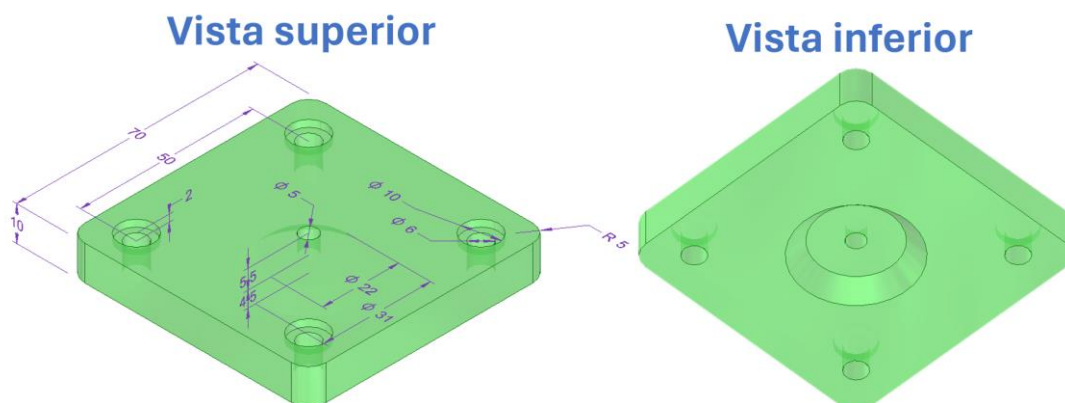


Figura 75: Utillaje para microscopio

Fuente: elaboración propia

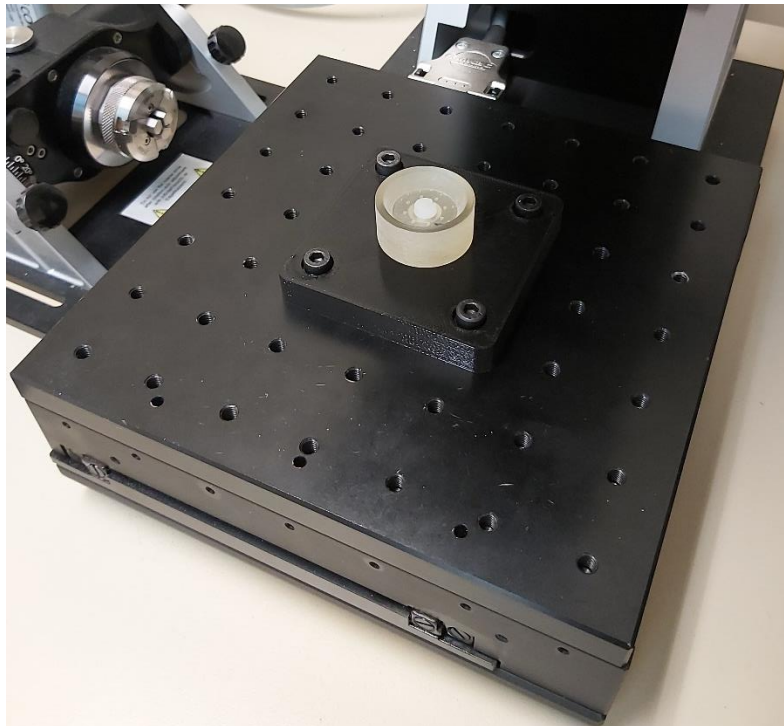
Este utillaje, ya que no requiere de gran precisión en su ejecución, se ha impreso en FFF, como se muestra en la Figura 76.



*Figura 76: Impresión del utillaje*

*Fuente: elaboración propia*

Una vez se ha colocado el utillaje en la mesa del microscopio y se ha fijado la pieza en él, este luce de la siguiente manera.



*Figura 77: Pieza fijada a la mesa del microscopio*

*Fuente: elaboración propia*

## Anexo B: Tablas de resultados y gráficos

### B.1. Tablas de datos

A continuación, se presentan las tablas de todos los datos recopilados para los diferentes poros de los diferentes pines. Hay que destacar que, en las tablas de los pines abiertos, en las imágenes, la línea azul es la superficie captada por el microscopio. Los huecos vacíos o con un “-“ son aquellos datos que por la forma inadecuada del poro no se han podido medir.

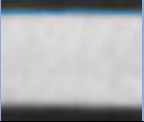







Dimensiones de los poros abiertos									
Pin 1			Tomografía del Pin abierto (Real)			Microscopio (Referencia)		Desviaciones	
Poronº	Sección longitudinal	Ø teórico (µm)	Ø (µm)	Altura (µm)	Cilindricidad (µm)	Ø (µm)	Altura (µm)	Desv Ø (µm)	Desv Altura (µm)
1		100	-	-	-	-	-		
2		150	238,39	79,24	-	-	115,23		-35,99
3		200	270,79	159,56	-	-	103,88		55,68
4		250	190,96	123,77	-	-	187,79		-64,02
5		300	315,12	307,28	180,84	151,94	400,39	163,18	-93,11
6		350	328,81	372,72	228,06	259,20	419,49	69,61	-46,77
7		400	465,11	1020,66	115,41	429,55	1046,51	35,56	-25,85
8		450	502,87	1013,24	88,59	513,97	1010,57	-11,10	2,67

Tabla 4: Dimensiones de los poros abiertos Pin 1

Fuente: elaboración propia


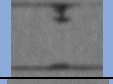



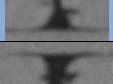


Dimensiones de los poros encapsulados										
Pin 1			Tomografía del Pin encapsulado (Real)			Desviaciones respecto a la tomografía del Pin abierto (Real)			Desviaciones respecto al Microscopio (Referencia)	
Por o nº	Sección longitudinal 1	Ø teórico (µm)	Ø (µm)	Altura (µm)	Cilindricidad (µm)	Desv Ø (µm)	Desv Altura (µm)	Desv Cilind (µm)	Desv Ø (µm)	Desv Altura (µm)
1		100	-	-	-					
2		150	107,14	282,12	-	131,25	-202,88			-166,89
3		200	252,19	224,12	-	18,60	-64,56			-120,24
4		250	223,90	157,99	-	-32,94	-34,22			29,80
5		300	329,82	343,04	217,46	-14,70	-35,76	-36,62	-177,88	57,35
6		350	350,87	1028,85	203,86	-22,06	-656,13	24,20	-91,67	-609,36
7		400	462,33	1010,76	148,28	2,78	9,90	-32,87	-32,78	35,75
8		450	502,08	1026,88	112,45	0,79	-13,64	-23,86	11,89	-16,31

Tabla 5: Dimensiones de los poros encapsulados Pin 1

Fuente: elaboración propia

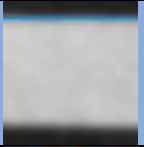
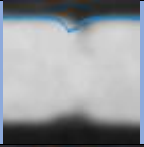






Dimensiones de los poros abiertos									
Pin 2			Tomografía del Pin abierto (Real)			Microscopio (Referencia)		Desviaciones	
Poros n°	Sección longitudinal	Ø teórico (µm)	Ø (µm)	Altura (µm)	Cilindricidad (µm)	Ø (µm)	Altura (µm)	Desv Ø (µm)	Desv Altura (µm)
1		100	-	-	-	-	-		
2		150	-	-	-	-	-		
3		200	235,91	1022,69	102,34	196,35	1054,49	39,56	-31,80
4		250	213,59	1023,09	56,59	202,03	1048,09	11,56	-25,00
5		300	335,03	1013,80	97,07	319,00	1077,00	16,03	-63,20
6		350	307,85	1023,96	117,46	311,68	105,09	-3,83	918,87
7		400	489,45	1026,68	99,21	374,92	1086,41	114,53	-59,73
8		450	509,46	1018,64	83,39	469,63	1071,45	39,83	-52,81

Tabla 6: Dimensiones de los poros abiertos Pin 2

Fuente: elaboración propia

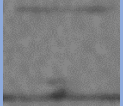

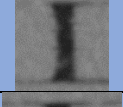



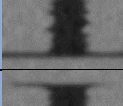
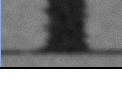
Dimensiones de los poros encapsulados										
Pin 2			Tomografía del Pin encapsulado (Real)			Desviaciones respecto a la tomografía del Pin abierto (Real)			Desviaciones respecto al Microscopio (Referencia)	
Poronº	Sección longitudinal	Ø teórico (µm)	Ø (µm)	Altura (µm)	Cilindricidad (µm)	Desv Ø (µm)	Desv Altura (µm)	Desv Cilind (µm)	Desv Ø (µm)	Desv Altura (µm)
1		100	-	-	-					
2		150	82,68	139,07	-					
3		200	233,24	1035,53	144,72	2,67	-12,84	-42,38	-36,89	18,96
4		250	228,59	1001,14	133,01	-15,00	21,95	-76,42	-26,56	46,95
5		300	344,52	1049,07	149,25	-9,49	-35,27	-52,18	-25,52	27,93
6		350	306,18	1029,47	211,10	1,67	-5,51	-93,64	5,50	-924,38
7		400	485,04	1064,69	124,19	4,41	-38,01	-24,98	-110,12	21,72
8		450	527,61	1050,07	80,80	-18,15	-31,43	2,59	-57,98	21,38

Tabla 7: Dimensiones de los poros encapsulados Pin 2

Fuente: elaboración propia

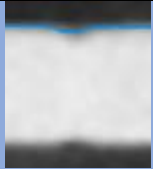
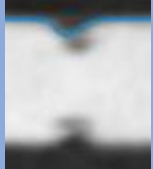
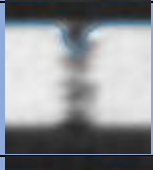
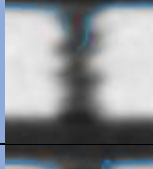
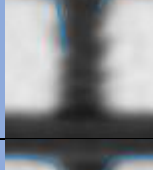



Dimensiones de los poros abiertos									
Pin 3			Tomografía del Pin abierto (Real)			Microscopio (Referencia)		Desviaciones	
Poros n°	Sección longitudinal	Ø teórico (µm)	Ø (µm)	Altura (µm)	Cilindricidad (µm)	Ø (µm)	Altura (µm)	Desv Ø (µm)	Desv Altura (µm)
1		100	-	-	-	-	-		
2		150	130,17	261,80	-	186,52	137,46	-56,35	124,34
3		200	224,68	470,07	159,5	216,74	289,23	7,94	180,84
4		250	298,03	1012,26	117,14	168,66	1082,21	129,37	-69,95
5		300	371,96	1003,71	72,84	328,05	1076,35	43,91	-72,64
6		350	385,18	1012,94	75,41	355,13	1075,14	30,05	-62,20
7		400	479,61	1013,66	85,96	384,83	1047,25	94,78	-33,59
8		450	511,84	1017,05	97,19	439,78	1051,09	72,06	-34,04

Tabla 8: Dimensiones de los poros abiertos Pin 3

Fuente: elaboración propia

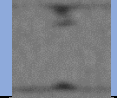
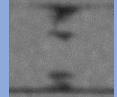


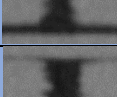
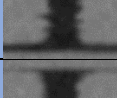


Dimensiones de los poros encapsulados										
Pin 3			Tomografía del Pin encapsulado (Real)			Desviaciones respecto a la tomografía del Pin abierto (Real)			Desviaciones respecto al Microscopio (Referencia)	
Por o nº	Sección longitudinal 1	Ø teórico (µm)	Ø (µm)	Altura (µm)	Cilindricidad (µm)	Desv Ø (µm)	Desv Altura (µm)	Desv Cilind (µm)	Desv Ø (µm)	Desv Altura (µm)
1		100	-	-	-					
2		150	182,61	180,68	-	-52,44	81,12		3,91	-43,22
3		200	255,50	1040,07	167,02	-30,82	-570,00	-7,52	-38,76	-750,84
4		250	318,27	1087,11	188,93	-20,24	-74,85	-71,79	-149,61	-4,90
5		300	390,20	1105,39	119,30	-18,24	-101,68	-46,46	-62,15	-29,04
6		350	403,78	1020,06	128,28	-18,60	-7,12	-52,87	-48,65	55,08
7		400	483,37	1047,90	131,54	-3,76	-34,24	-45,58	-98,54	-0,65
8		450	522,92	1047,18	132,64	-11,08	-30,13	-35,45	-83,14	3,91

Tabla 9: Dimensiones de los poros encapsulados Pin 3

Fuente: elaboración propia



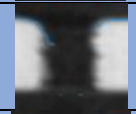



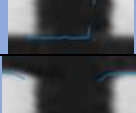

Dimensiones de los poros abiertos									
Pin 4			Tomografía del Pin abierto (Real)			Microscopio (Referencia)		Desviaciones	
Poronº	Sección longitudinal	Ø teórico (µm)	Ø (µm)	Altura (µm)	Cilindricidad (µm)	Ø (µm)	Altura (µm)	Desv Ø (µm)	Desv Altura (µm)
9		500	572,43	1020,64	55,57	530,57	1079,24	41,86	-58,60
10		600	686,13	1021,22	85,7	608,18	1093,32	77,95	-72,10
11		700	745,52	1018,09	115,01	651,67	1070,90	93,85	-52,81
12		800	873,66	1026,86	93,66	815,96	1067,85	57,70	-40,99
13		900	1000,54	1027,45	99,8	943,28	1060,77	57,26	-33,32
14		1000	1115,7	1019,34	115,22	1030,72	1052,52	84,98	-33,18
15		1100	1183,75	1020,79	141,21	1147,56	1048,98	36,19	-28,19
16		1200	1305,39	1019,18	106,34	1216,57	1069,47	88,82	-50,29

Tabla 10: Dimensiones de los poros abiertos Pin 4

Fuente: elaboración propia





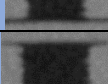
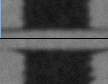
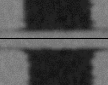

Dimensiones de los poros encapsulados										
Pin 4			Tomografía del Pin encapsulado (Real)			Desviaciones respecto a la tomografía del Pin abierto (Real)			Desviaciones respecto al Microscopio (Referencia)	
Por o n°	Sección longitudinal	Ø teórico (µm)	Ø (µm)	Altura (µm)	Cilindricidad (µm)	Desv Ø (µm)	Desv Altura (µm)	Desv Cilind (µm)	Desv Ø (µm)	Desv Altura (µm)
9		500	583,99	1064,98	116,14	-11,56	-44,34	-60,57	-53,42	14,26
10		600	688,23	1119,18	177,97	-2,10	-97,96	-92,27	-80,05	-25,86
11		700	754,88	1121,13	212,95	-9,36	-103,04	-97,94	-103,21	-50,23
12		800	872,76	1103,47	135,09	0,90	-76,61	-41,43	-56,80	-35,62
13		900	1006,56	1057,51	124,13	-6,02	-30,06	-24,33	-63,28	3,26
14		1000	1115,23	1055,30	142,07	0,47	-35,96	-26,85	-84,51	-2,78
15		1100	1186,24	1055,39	182,71	-2,49	-34,60	-41,50	-38,68	-6,41
16		1200	1303,53	1046,80	182,55	1,86	-27,62	-76,21	-86,96	22,67

Tabla 11: Dimensiones de los poros encapsulados Pin 4

Fuente: elaboración propia


Dimensiones de los poros abiertos									
Pin 5			Tomografía del Pin abierto (Real)			Microscopio (Referencia)		Desviaciones	
Poronº	Sección longitudinal	Ø teórico (µm)	Ø (µm)	Altura (µm)	Cilindricidad (µm)	Ø (µm)	Altura (µm)	Desv Ø (µm)	Desv Altura (µm)
9		500	568,21	1015,89	77,86	505,71	1053,98	62,50	-38,09
10		600	657,03	1013,96	99,27	594,92	1032,77	62,11	-18,81
11		700	779,96	1017,76	105,62	710,82	1063,35	69,14	-45,59
12		800	878,44	1020,19	96,67	778,79	1049,58	99,65	-29,39
13		900	1000,4	1024,13	116,06	925,36	1081,43	75,04	-57,30
14		1000	1083,57	1008,68	125,45	990,39	1071,45	93,18	-62,77
15		1100	1190,14	1016,12	118,89	1070,38	1079,91	119,76	-63,79
16		1200	1280,23	1024,18	126,52	1234,14	1052,35	46,09	-28,17

Tabla 12: Dimensiones de los poros abiertos Pin 5

Fuente: elaboración propia









Dimensiones de los poros encapsulados										
Pin 5			Tomografía del Pin encapsulado (Real)			Desviaciones respecto a la tomografía del Pin abierto (Real)			Desviaciones respecto al Microscopio (Referencia)	
Por o nº	Sección longitudinal 1	Ø teórico (µm)	Ø (µm)	Altura (µm)	Cilindricidad (µm)	Desv Ø (µm)	Desv Altura (µm)	Desv Cilind (µm)	Desv Ø (µm)	Desv Altura (µm)
9		500	573,92	1072,43	106,86	-5,71	-56,54	-29,00	-68,21	-18,45
10		600	657,49	1055,15	139,29	-0,46	-41,19	-40,02	-62,57	-22,38
11		700	782,83	1053,85	148,46	-2,87	-36,09	-42,84	-72,01	9,50
12		800	880,70	1063,51	137,27	-2,26	-43,32	-40,60	-101,91	-13,93
13		900	1001,90	1066,49	130,78	-1,50	-42,36	-14,72	-76,54	14,94
14		1000	1086,46	1067,34	134,73	-2,89	-58,66	-9,28	-96,07	4,11
15		1100	1195,09	1065,02	174,12	-4,95	-48,90	-55,23	-124,71	14,89
16		1200	1282,65	1053,92	151,20	-2,42	-29,74	-24,68	-48,51	-1,57

Tabla 13: Dimensiones de los poros encapsulados Pin 5

Fuente: elaboración propia


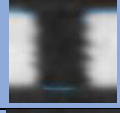



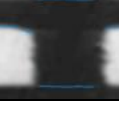
Dimensiones de los poros abiertos									
Pin 6			Tomografía del Pin abierto (Real)			Microscopio (Referencia)		Desviaciones	
Poronº	Sección longitudinal	Ø teórico (µm)	Ø (µm)	Altura (µm)	Cilindricidad (µm)	Ø (µm)	Altura (µm)	Desv Ø (µm)	Desv Altura (µm)
9		500	575,62	1017,56	71,07	528,35	1045,63	47,27	-28,07
10		600	675,84	1019,58	99,09	619,63	1047,44	56,21	-27,86
11		700	781,49	1022,81	111,18	685,59	1070,92	95,90	-48,11
12		800	878,33	1017,83	95,03	811,92	1088,85	66,41	-71,02
13		900	1001,21	1017,65	88,54	955,66	1105,83	45,55	-88,18
14		1000	1098,93	1026,54	84,08	1027,97	1095,19	70,96	-68,65
15		1100	1158,34	1021,36	101,76	1076,98	1054,87	81,36	-33,51
16		1200	1257,76	1012,76	123,47	1198,56	1031,77	59,20	-19,01

Tabla 14: Dimensiones de los poros abiertos Pin 6

Fuente: elaboración propia









Dimensiones de los poros encapsulados										
Pin 6			Tomografía del Pin encapsulado (Real)			Desviaciones respecto a la tomografía del Pin abierto (Real)			Desviaciones respecto al Microscopio (Referencia)	
Por o nº	Sección longitudinal 1	Ø teórico (µm)	Ø (µm)	Altura (µm)	Cilindricidad (µm)	Desv Ø (µm)	Desv Altura (µm)	Desv Cilind (µm)	Desv Ø (µm)	Desv Altura (µm)
9		500	585,35	1080,50	114,87	-9,73	-62,94	-43,80	-57,00	-34,87
10		600	684,82	1067,10	145,91	-8,98	-47,52	-46,82	-65,19	-19,66
11		700	790,99	1085,35	164,38	-9,50	-62,54	-53,20	-105,40	-14,43
12		800	881,66	1110,22	158,62	-3,33	-92,39	-63,59	-69,74	-21,37
13		900	1005,46	1104,17	117,91	-4,25	-86,52	-29,37	-49,80	1,66
14		1000	1103,34	1083,34	132,08	-4,41	-56,80	-48,00	-75,37	11,85
15		1100	1164,02	1057,44	143,32	-5,68	-36,08	-41,56	-87,04	-2,57
16		1200	1269,59	1040,21	166,80	-11,83	-27,45	-43,33	-71,03	-8,44

Tabla 15: Dimensiones de los poros encapsulados Pin 6

Fuente: elaboración propia

## B.2. Gráficos resumen

De manera más visual, se representan los datos de las tablas anteriores en los gráficos siguientes. En la Figura 78 se refleja el valor del diámetro, la altura y la cilindridad de todos los poros de los seis pines en el caso de la tomografía de los pines abiertos.

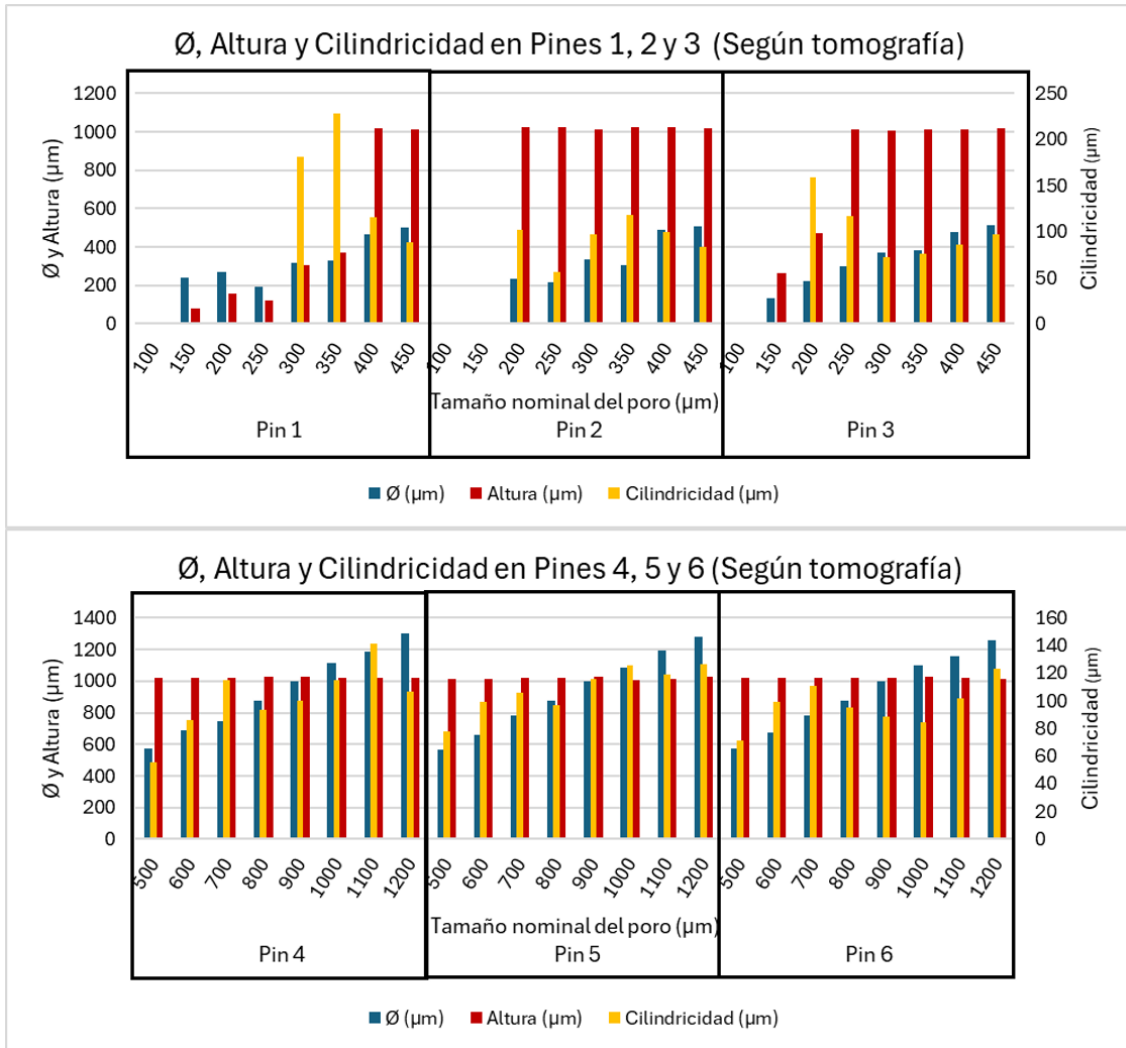


Figura 78: Diámetro, altura y cilindridad de la Tomografía de los Pines Abiertos

Fuente: elaboración propia

En la Figura 79 se muestran los valores de diámetro y altura para todos los poros de los seis pines. En el caso del microscopio no existen cilindrificadas medidas por la forma del volumen 3D, como se ha comentado en el punto “3.2. Inspección de los poros”.

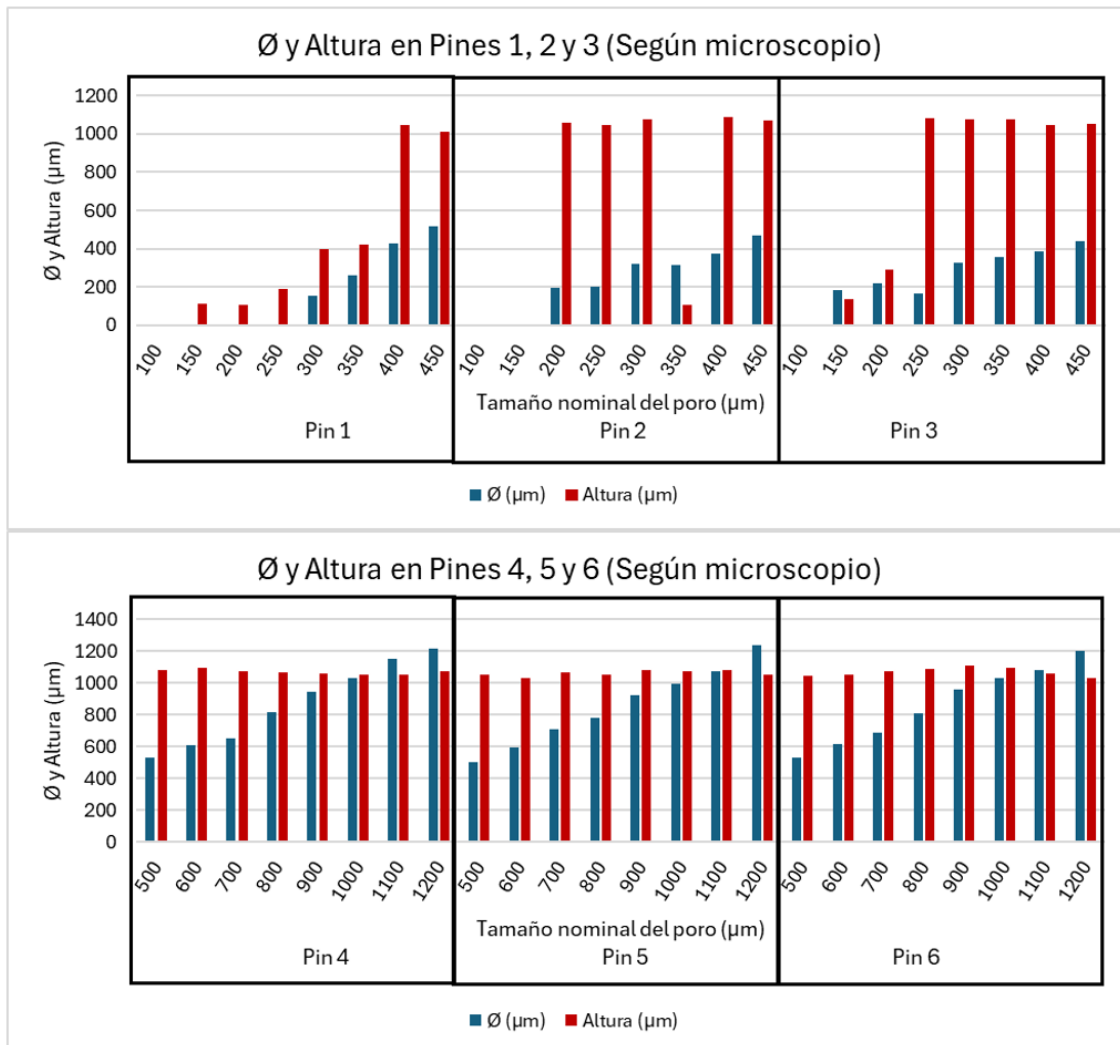


Figura 79: Diámetro y Altura del Microscopio

Fuente: elaboración propia

En la Figura 80 se reflejan los valores del diámetro, la altura y la cilindridad de todos los poros de los seis pines en el caso de la tomografía de los pines encapsulados.

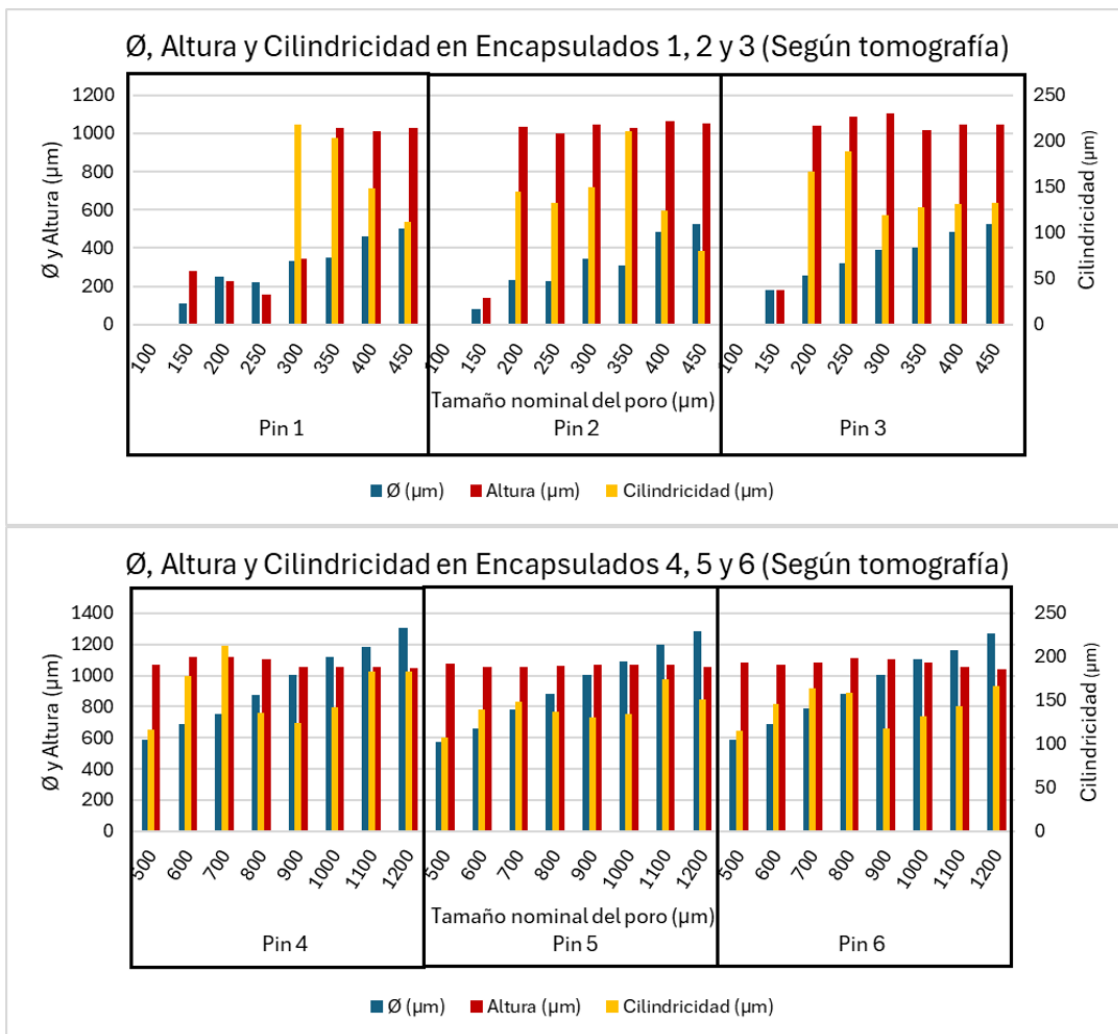


Figura 80: Diámetro, altura y cilindridad de la Tomografía de los Pines Encapsulados

Fuente: elaboración propia

En la Figura 81 se presentan las gráficas comparativas del diámetro según el microscopio y la tomografía de los pines encapsulados.

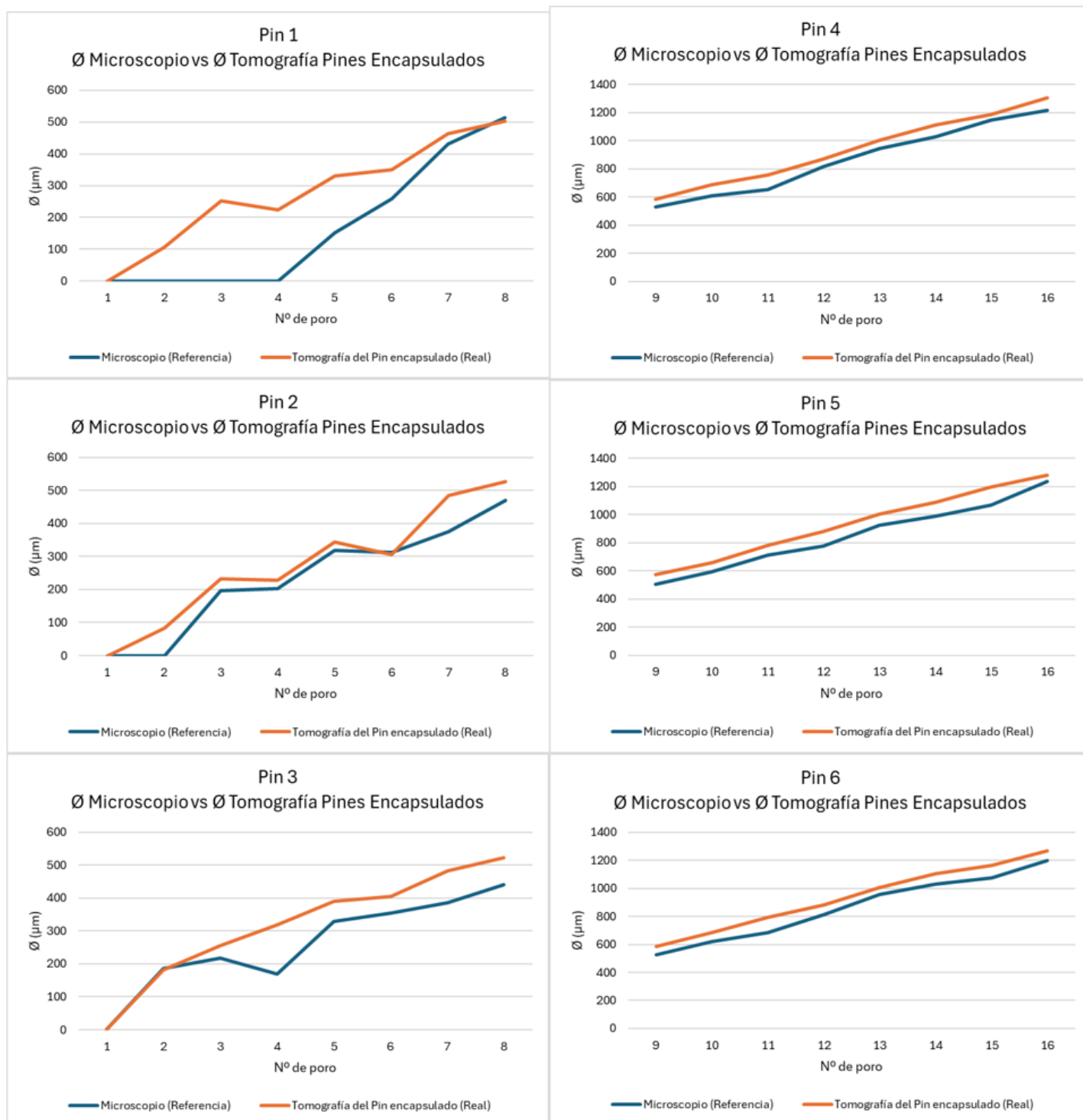


Figura 81: Ø Microscopio vs Ø Tomografía Pines Encapsulados

Fuente: elaboración propia

En la Figura 82 se exponen las gráficas comparativas de la altura según el microscopio y la tomografía de los pines encapsulados.



Figura 82: Altura Microscopio vs Altura Tomografía Pines Encapsulados

Fuente: elaboración propia



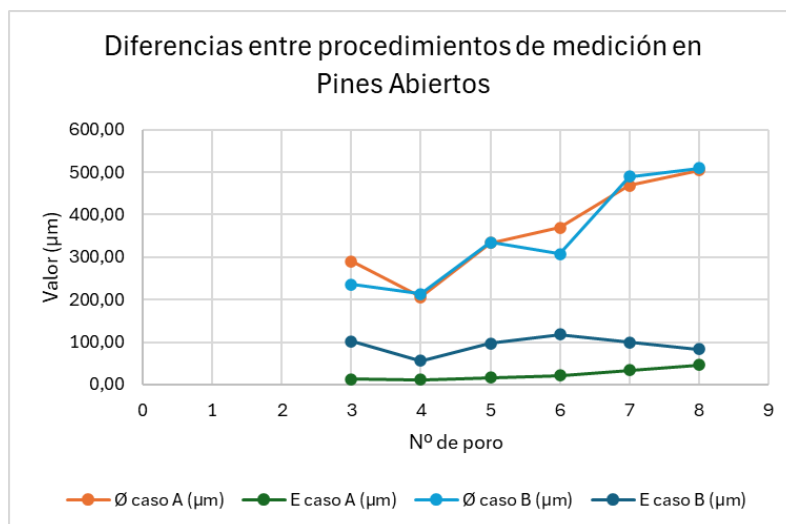


Figura 84: Gráfica comparación casos (a) y (b) para Pines Abiertos

Fuente: elaboración propia

En el caso de los pines encapsulados, el proceso de selección de puntos en el volumen 3D ha sido similar al comentado anteriormente para los pines abiertos. Concretamente, como se muestra en la Figura 85 en el caso (b), se han seleccionado los puntos de la malla que no engloban parte de ese *gap* existente a ambos extremos del poro. Otro método también explorado en el trabajo ha sido el caso (a), en el cual se selecciona a bloque todos los puntos del poro, incluyendo así puntos del *gap* de la parte inferior.

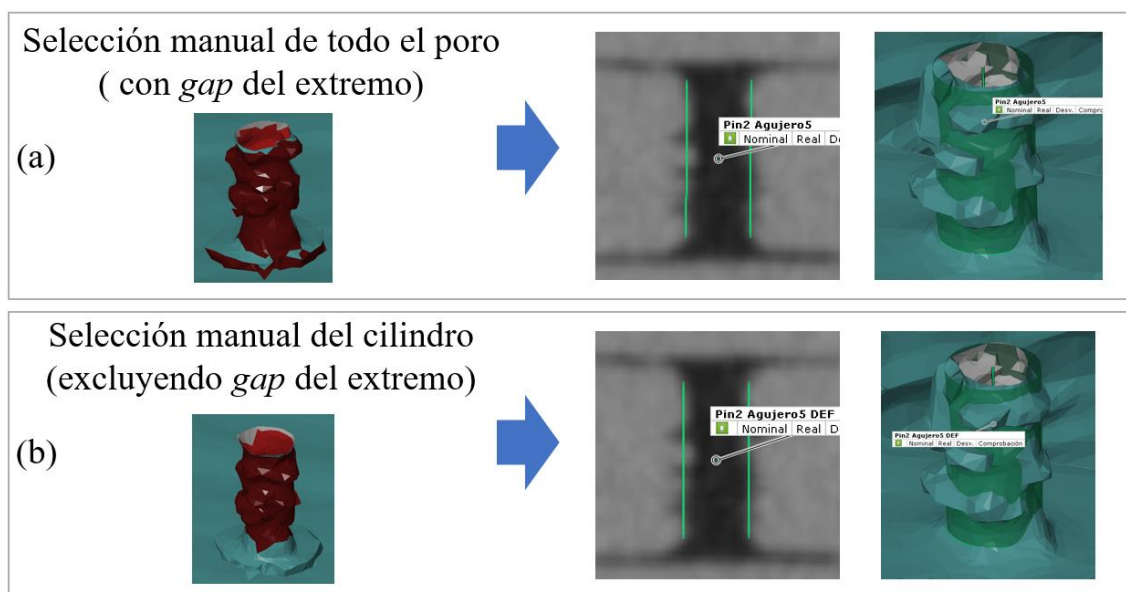


Figura 85: Casos de creación de cilindros en Pines Encapsulados

Fuente: elaboración propia

En la Figura 86 se muestra la diferencia entre diámetros y cilindridades medidos con el procedimiento del caso (a) y el caso (b). Los diámetros resultantes del caso (a), ya que incluyen puntos del *gap* que se encuentran más exteriores al centro del poro, resultan algo más grandes que en el caso (b), que solamente selecciona los puntos del propio poro. En lo que respecta a los errores de forma, estos resultan también notablemente mayores en el caso (a) por los mismos

motivos. Por estas razones se ha utilizado el procedimiento del caso (b) en la realización de este trabajo, pues muestra datos más precisos y centrados en el poro que se quiere estudiar.

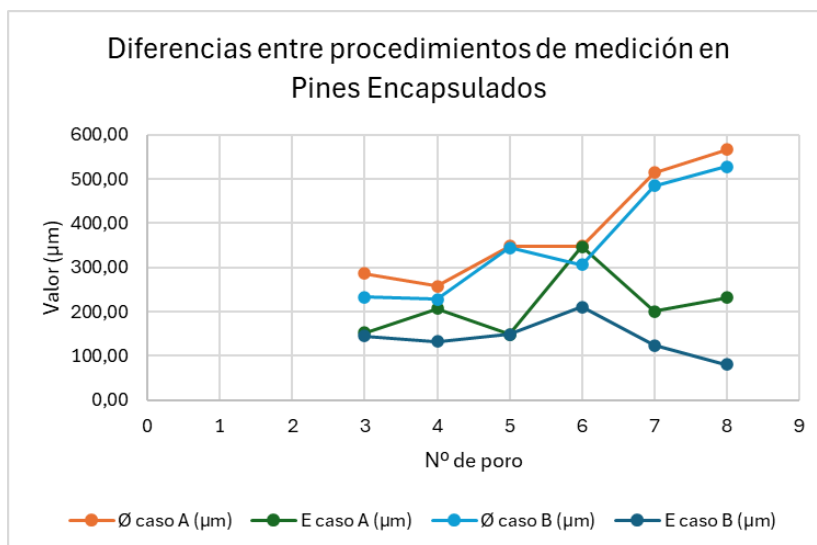


Figura 86: Gráfica comparación casos (a) y (b) para Pines Encapsulados

*Fuente: elaboración propia*

Aunque realizar las medidas con los procedimientos que se han utilizado en este trabajo pueda parecer trivial, al principio del mismo no lo era, y se ha tenido que experimentar con diferentes modos de análisis de los datos para llegar a la solución final. Con esta solución se ha conseguido que las dimensiones obtenidas de todas las tomas de datos reflejen errores de forma similares, lo que aporta mayor robustez y credibilidad al tratamiento de datos que se ha hecho.

## **Anexo D: Especificaciones de la maquinaria empleada**

A continuación, se presentan las hojas de especificaciones de las máquinas empleadas en la realización del presente trabajo.

Se disponen en el siguiente orden:

1. Hoja de especificaciones de Objet Eden 350 V
2. Hoja de especificaciones de Metrotom 800 225 kv
3. Hoja de especificaciones de Alicona InfiniteFocusSL



# Objet

## EDEN350V

### Mid-sized high-quality prototyping.

The Objet Eden350V™ offers power and productivity along with 18 different materials on a mid-sized build platform. With ultrafine 16 micron layers, the Objet Eden350V rapidly prints models with smooth surfaces, thin walls, and complex shapes.

Office-friendly, the Objet Eden350V has a mid-sized 350 x 350 x 200 mm (13.8 x 13.8 x 7.8 in) tray size and a quiet, clean process based on PolyJet technology.

### Empower your printing with 18 material options.

The Objet Eden350V offers a wide variety of materials including:

- **Transparent materials** (RGD720) for standard plastics simulation requiring dimensional stability and smooth surfaces, as well as (VeroClear™), a nearly colorless material for models, that mimics transparent thermoplastics like Poly(methyl methacrylate) (PMMA)
- **Rigid Opaque materials** (Vero family) in a variety of colors including white, gray, blue and black
- **Simulated Polypropylene materials** (Rigur™ & Durus™) for polypropylenelike snap fit applications, flexible closures and living hinges, reusable containers and white appliances
- **Rubber-like materials** (Tango family) suitable for a range of applications requiring non-slip or soft surfaces
- **High Temperature material** (RGD525) for advanced functional testing, hot air and water flow, and static applications



LEARN MORE ABOUT OBJET EDEN350V AT [STRATASYS.COM](https://www.stratasys.com)



## PRODUCT SPECIFICATIONS

### Model Materials:

- VeroClear
- Rubber-like (Tango)
- FullCure® (RGD720)
- Rigid Opaque (Vero) in white, gray, blue & black
- Simulated Polypropylene (Rigur & Durus)
- High Temperature (RGD525)

### Support Material:

FullCure 705 non-toxic gel-like photopolymer support

### Build Size:

340 x 340 x 200 mm (13.4 x 13.4 x 7.9 in)

### Layer Thickness:

Horizontal build layers down to 16-microns (0.0006 in)

### Workstation Compatibility:

Windows 7 32/64-bit

### Network Connectivity:

LAN – TCP/IP

### Size and Weight:

Objet Eden350V:  
1320 x 990 x 1200 mm  
(52.0 x 39.0 x 47.25 in)  
410 kg (902 lbs)

### Power Requirements:

110–240 VAC 50/60 Hz; 1.5 KW single phase

### Regulatory Compliance:

CE, FCC

### Special Facility Requirements:

Temperature 18–25 °C (64–77 °F);  
relative humidity 30–70% (non-condensing)

## BREAK THROUGH DESIGN BARRIERS WITH THIS MID-SIZED DYNAMO.

### Backed by proven PolyJet™ technology.

The Objet Eden350V employs proven PolyJet technology. PolyJet 3D Printing is similar to inkjet document printing. But instead of jetting drops of ink onto paper, PolyJet 3D Printers jet layers of liquid photopolymer onto a build tray and cure them with UV light. The layers build up one at a time to create a 3D model or prototype. Fully-cured models can be handled and used immediately without additional post-curing. Along with the selected model material, the 3D printer also jets a gel-like support material specially designed to uphold overhangs and complicated geometries. It is easily removed using a WaterJet.

PolyJet 3D Printing technology has many advantages for rapid prototyping, including professional quality and speed, high precision, and a wide variety of materials. PolyJet technology is a perfect solution for precision prototyping needs and sets the standard for finished-product realism.

### Objet Studio™: Intuitive 3D Printing Software.

Objet Studio makes it simple to build high-quality, accurate 3D models. It automatically transforms STL and SLC files from any 3D CAD application into 3D modeling slices of build material and support. With click-and-build wizards, you can quickly edit trays, assign materials, manage print jobs and perform routine system maintenance. Objet Studio features:

- Automatic support generation
- On-the-fly slicing so printing can start right away
- Auto-placement of trays for accurate, consistent positioning
- Multi-user networking

### Objet Eden350V Makes 3D Printing As Easy As 1-2-3.

1. **Prepare the file.** Create your 3D model with 3D CAD software, then open Objet Studio software, upload the STL file and click "print." Objet Studio converts your STL file into 3D model print paths – including support structures.
2. **Print your model.** PolyJet technology makes it possible to build your 3D model and its support material – layer by layer – from the bottom up.
3. **Remove supports.** Take your printed model out of the printer's build chamber and easily remove support material using a WaterJet.

**stratasys**

E info@stratasys.com / STRATASYS.COM  
ISO 9001:2008 Certified

### HEADQUARTERS

7665 Commerce Way, Eden Prairie, MN 55344  
+1 888 480-3548 (US Toll Free)  
+1 952 937-3000 (Intl)  
+1 952 937-0070 (Fax)

2 Holtzman St., Science Park, PO Box 2496  
Rehovot 76124, Israel  
+972 74 745-4000  
+972 74 745-5000 (Fax)

©2014 Stratasys Ltd. All rights reserved. Stratasys, Stratasys logo, Objet, For a 3D World, Objet Studio, Eden, Eden260, Eden260V, Eden350, Eden350V, Eden500V, Objet500 Connex3, Connex, Objet260 Connex, Connex350, Connex500, TangoBlack, TangoGray, TangoPlus, TangoBlackPlus, VeroBlue, VeloBlack, VeroBlackPlus, VeroClear, VeroDent, VeroGray, VeroWhite, VeroWhitePlus, Durus, Rigur, Digital Materials, Digital ABS, Digital ABS2, ObjetGreen, FullCure and PolyJet are trademarks or registered trademarks of Stratasys Ltd. and/or its subsidiaries or affiliates and may be registered in certain jurisdictions. PSS\_PJ\_Eden350V\_EN\_0815



# **ZEISS METROTOM**

## Specifications

Version: 2021-11



Seeing beyond

## System description

ZEISS METROTOM	1	800 / 130 kV	6 scout	800 / 225 kV	800/225 kV HR	1500/225 kV
Operating mode	Stop and go mode, VAST scan mode	Stop and go mode, VAST scan mode, measurement in the image	Stop and go mode, VAST scan mode,	Stop and go mode, VAST scan mode, measurement in the image	Stop and go mode, VAST scan mode, measurement in the image	Stop and go mode, VAST scan mode, measurement in the image
<b>Measuring principle</b>	Measurement of the attenuation of the X-ray radiation due to the component geometry and the density of the material used. The volume data is calculated using the Feldkamp reconstruction algorithm.					
<b>Sensor technology</b>	Flat-panel detector					
<b>Software</b>	GOM Volume Inspect Pro line	ZEISS METROTOM OS / GOM Volume Inspect Pro	GOM Volume Inspect Pro line	ZEISS METROTOM OS / GOM Volume Inspect Pro	ZEISS METROTOM OS / GOM Volume Inspect Pro	ZEISS METROTOM OS / GOM Volume Inspect Pro
<b>Applications</b>	Dimensional measurements and material analysis					

## Radiation generation and sensor technology

ZEISS METROTOM	1	800/130 kV	6 scout	800/225 kV	800/225 kV HR	1500/225 kV		
<b>X-ray tube</b>	Max. tube voltage	in kV	160	130	225	225	225	
	Max. tube current	in $\mu$ A	7000	300	1000	3000	3000	
	Max. target performance	in W	600	39	50	500	500	
	Min. focal spot size	in mm	0.4	0.005	0.004	0.007	0,007	
<b>Detector</b>	Number of pixels <sup>1)</sup>		2560 x 2560	1536 x 1920	3008 x 2514	1024 x 1024	1920 x 1536	3072 x 3072
	Pixel size	in $\mu$ m	78 x 78	127 x 127	100 x 100	200 x 200	127 x 127	139 x 139

## Resolution (ISO 15708)<sup>2)</sup>

ZEISS METROTOM	1	800/130 kV	6 scout	800/225 kV	800/225 kV HR	1500/225 kV	
<b>Maximum spatial resolution at 10 % modulation transfer</b>	in $\mu$ m	–	3.5 (143 lp/mm <sup>3)</sup> )	–	6.0 (83 lp/mm <sup>3)</sup> )	4.0 (125 lp/mm <sup>3)</sup> )	4.0 (125 lp/mm <sup>3)</sup> )

## Accuracy (MPE complies with VDI/VDE 2630 sheet 1.3)<sup>4)</sup>

ZEISS METROTOM	1	800/130 kV	6 scout	800/225 kV	800/225 kV HR	1500/225 kV			
<b>Stop and go mode</b>	<b>Sphere center point error</b>	SD (TS)	in $\mu$ m	*	2.9+L/100	3.0+L/100	4.0+L/100	4.0+L/100	4.5+L/50
		PS (TS)	in $\mu$ m	*	3	3	3	3	3
		PF (TS)	in $\mu$ m	*	4	*	4	4	4
	<b>Length measurement error<sup>6)</sup></b>	E (TS)	in $\mu$ m	*	6.9+L/100	*	8+L/100	8+L/100	9+L/50
<b>VAST scan mode<sup>5)</sup></b>	<b>Sphere center point error</b>	SD (TS)	in $\mu$ m	*	2.9+L/100	*	4.0+L/100	4.0+L/100	4.5+L/50
		PS (TS)	in $\mu$ m	–	3	–	4	4	4
		PF (TS)	in $\mu$ m	–	4	–	4	4	4,5
	<b>Length measurement error<sup>6)</sup></b>	E (TS)	in $\mu$ m	–	6.9+L/100	–	9+L/100	9 +L/100	10.5+L/50

\* on request

1) Measurement in the image not available for ZEISS METROTOM 6 scout

2) GOM CT Professional only for METROTOM 1 and METROTOM 6 scout

3) Max. 3% bleed on each detector margin

4) Factory inspection prior to delivery

5) lp/mm = line pairs per millimeter

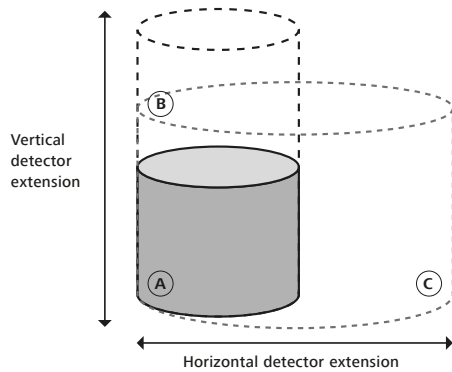
6) Accuracy specification is valid for measurement in the image without image field extension.

7) Accuracy specification is valid for VAST scan mode for number of projections  $\geq$  of number of projections recommended by METROTOM OS

8) Measuring length L in mm.

### Measuring range

ZEISS METROTOM	1	800/130 kV	6 scout	800/225 kV	800/225 kV HR	1500/225 kV			
		Portrait (Standard)	Landscape		Portrait (Standard)	Landscape			
A) in the image without image field extension	Max. Diameter	in mm 165	150	170	240	170	150	170	330
	Max. Height	in mm 140	170	115	200	150	170	115	270
B) with max. vertical image field extension	Max. Diameter	in mm –	150	170	240	170	150	170	330
	Max. Height	in mm –	360	360	400	405	400	385	870
C) with max. vertical and horizontal image field extension [optional]	Max. Diameter	in mm –	275	300	–	300	275	300	615
	Max. Height	in mm –	360	360	–	390	380	360	800



- Ⓐ Imaging volume without image field extension
- Ⓑ With maximal vertical image field extension
- Ⓒ With maximal vertical and horizontal image field extension [optional]

### Travel path

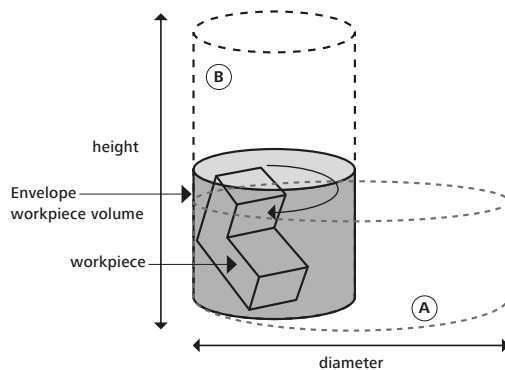
ZEISS METROTOM	1 <sup>1)</sup>	800/130 kV	6 scout	800/225 kV // 800/225 kV HR	1500/225 kV
x axis	in mm –	700	650	700	1150
y axis	in mm –	270	–	270	300
z axis	in mm –	270	390	270	600
xy table	in mm –	–	24	–	–

### Workpiece size<sup>2)</sup>

ZEISS METROTOM	1	800/130 kV	6 scout	800/225 kV // 800/225 kV HR	1500/225 kV
Max. workpiece weight	in kg 5	5	5	5	50 <sup>3)</sup>

### Maximum fittable workpieces sizes with limitation of travel and measuring range

A) optimized for max. diameter	Diameter	in mm 200	400	320	650	770
	Height	in mm 400	255	–	550	1350
B) optimized for max. height	Diameter	in mm 200	300	–	550	615
	Height	in mm 400	620	750	800	1500



- Ⓐ Max. fittable workpiece size optimized for maximum diameter (with limitation of travel and measuring range)
- Ⓑ Max. fittable workpiece size optimized for maximum height (with limitation of travel and measuring range)

1) fixed position

2) The theoretical max. workpiece size is given. Given values describe the envelop cylinder when part is rotated. Sample holders are not yet considered and might reduce the given values.

3) Max. acceptable mass moment of inertia  $J = 0.6 \text{ kgm}^2$  and max. acceptable breakdown torque 10 Nm.

## Technical features

ZEISS METROTOM	1	800/130 kV	6 scout	800/225 kV // 800/225 kV HR	1500/225 kV
Positioning system	Design: welded steel design	Design: welded steel design with 3 linear axes	Design: 5 axis kinematics mounted on granite	Design: welded steel design with 3 linear axes	Design: welded steel design with 3 linear axes
Length measuring system	–	Electro-optical reflected light system, photoelectric, resolution 0.2 µm	Electro-optical reflected light system, photoelectric, resolution 0.01 µm	Electro-optical reflected light system, photoelectric, resolution 0.2 µm	Electro-optical reflected light system, photoelectric, resolution 0.1 µm
Protective enclosure	The ZEISS METROTOM 1 system fulfills the conditions of §21 of the Strahlenschutzverordnung (StrlSchV). It, thus, meets the technical requirements for a fully protected device.	The ZEISS METROTOM 800 system fulfills the conditions of §21 of the Strahlenschutzverordnung (StrlSchV). It, thus, meets the technical requirements for a fully protected device.	The ZEISS METROTOM 6 scout system fulfills the conditions of §21 of the Strahlenschutzverordnung (StrlSchV). It, thus, meets the technical requirements for a fully protected device.	The ZEISS METROTOM 800 (HR) system fulfills the conditions of §21 of the Strahlenschutzverordnung (StrlSchV). It, thus, meets the technical requirements for a fully protected device.	The ZEISS METROTOM 1500 system fulfills the conditions of §21 of the Strahlenschutzverordnung (StrlSchV). It, thus, meets the technical requirements for a fully protected device.
Clamping device	Changer pallet on rotary table with 170 mm diameter	Changer pallet on rotary table with 170 mm diameter	Changer pallet on rotary table with 210 mm diameter	Changer pallet on rotary table with 170 mm diameter	Changer pallet on rotary table with 300 mm diameter

## Environmental requirements <sup>3)</sup>

ZEISS METROTOM	1	800/130 kV	6 scout	800/225 kV // 800/225 kV HR	1500/225 kV
Relative humidity	40 % - 70 %	40 % - 70 %	40 % - 70 %	40 % - 70 %	40 % - 70 %
Measuring reference temperature	18 °C - 22 °C	18 °C - 22 °C	18 °C - 22 °C	18 °C - 22 °C	18 °C - 22 °C
	per day 2.0 K/d	2.0 K/d	2.0 K/d	2.0 K/d	2.0 K/d
	per hour 1.0 K/h	1.0 K/h	1.0 K/h	1.0 K/h	1.0 K/h
	spatial 1.0 K/m	1.0 K/m	1.0 K/m	1.0 K/m	1.0 K/m

## Requirements for operational readiness

ZEISS METROTOM	1	800/130 kV	6 scout	800/225 kV // 800/225 kV HR	1500/225 kV
Relative humidity	40 % - 70 %	40 % - 70 %	40 % - 70 %	40 % - 70 %	40 % - 70 %
Ambient temperature	15 °C - 30 °C	15 °C - 35 °C	15 °C - 30 °C	15 °C - 35 °C	15 °C - 35 °C
Power rating	Power supply: 220/340/374/400/440/484 V ~ (+-5%) Type of current: L1/L2/L3/(N)/PE Frequency: 50 bis 60 Hz (±3,5%) Max. power consumption: 6 kVA Typ. energy demand: 4 kWh Heat emission for typ. energy demand: 4 kW Fuse at: 3 x 340-484V: C 16 A Fuse at: 3 x 220V: C 25 A	Power supply: 100/110/120/125/230/240 V ~ (+-10%) Type of current: 1/N/PE Frequency: 50 - 60 Hz (+-3.5%) Max. power consumption: 2.5 kVA Typ. energy demand: 1kWh (typically energy demand depends on installed hardware) Heat emission for typ. energy demand: 1 kW Fuse: C 25 A	Power supply: 3x220/340/374/400/440/484 V ~ (+-5%) Type of current: L1/L2/L3/(N)/PE Frequency: 50 bis 60 Hz (±3,5%) Max. power consumption: 5 kVA Typ. energy demand: 2.5-3 kWh Heat emission for typ. energy demand: 3 kW Fuse: C 16 A	Power supply: 400/230 V ~ (+-10%) Type of current: 3/N/PE Frequency: 50 - 60 Hz (+-3.5%) Max. power consumption: 6.2 kVA Typ. energy demand: 1.5-2.5 kWh (typically energy demand depends on installed hardware) Heat emission for typ. energy demand: 2.5 kW Fuse: C 32 A	Power supply: 400/230 V ~ (+-10%) Type of current: 3/N/PE Frequency: 50 - 60 Hz (+-3.5%) Max. power consumption: 6.2 kVA Typ. energy demand: 1.5-2.5 kWh (typically energy demand depends on installed hardware) Heat emission for typ. energy demand: 2.5 kW Fuse: C 32 A

## Approvals

Regulations ZEISS METROTOM 1, ZEISS METROTOM 800, ZEISS METROTOM 6 scout and ZEISS METROTOM 1500 complies with EC machine directive 2006/42/EC, EMC directive 2014/30/EU, IEC/EN 61010-2-091, CFR 1020.40. ZEISS METROTOM 800/130 kV additionally cCSAus-authorization.



Disposal ZEISS products and packaging returned to us are disposed of in accordance with applicable legal provisions.

## Certifications/accreditations

Quality management system	ISO 9001:2015, VDA 6, Parts 4, 3. Version 2017
Environmental management system	ISO 14001:2015
Occupational health & safety management systems	BS OHSAS 18001:2007 <sup>2)</sup>
Accredited	ISO / IEC 17025:2005 <sup>3)</sup>

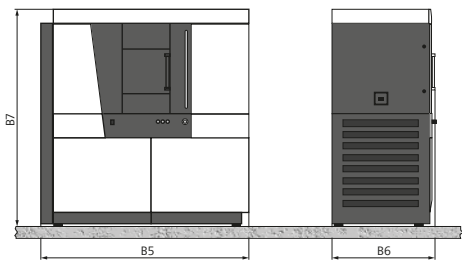
1) To ensure specified accuracies.

2) NS OHSAS 18001 will be replaced by ISO 45001 during 2020.

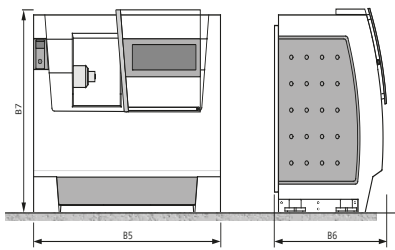
3) Does not apply to ZEISS METROTOM 6 scout and ZEISS METROTOM 1

sizes	Dimensions in mm			Weight in kg
	Overall machine dimensions			
	Width	Length	Height	
<b>ZEISS METROTOM</b>	<b>B6</b>	<b>B5</b>	<b>B7</b>	
1	870	1750	1820	2100
800/130 kV	1310	2190	1960	5950
6 scout	1230	2200	2210	4800
800/225 kV // 800/225 kV HR	1820	3200	2050	5000
1500/225 kV	1810	3700	2440	6600

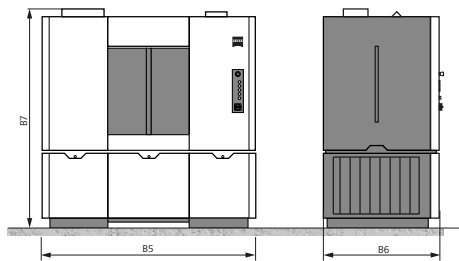
ZEISS METROTOM 1



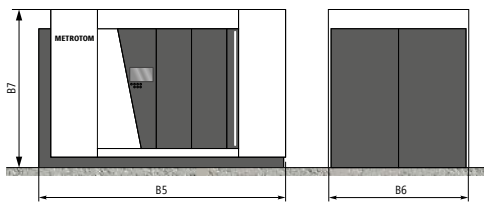
ZEISS METROTOM 800/130 kV



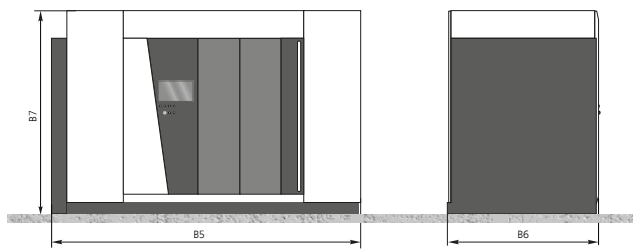
ZEISS METROTOM 6 scout



ZEISS METROTOM 800/225 kV // 800/225 kV HR



ZEISS METROTOM 1500/225 kV



Note: the given dimensions and weights are approximate values. Subject to change.  
Actual appearance of specific sizes may vary from illustration. Dimensioning based on DIN 4000-167:2009.

**Carl Zeiss**

**Industrielle Messtechnik GmbH**

73446 Oberkochen / Germany

Sales: +49 7364 20-6336

Service: +49 7364 20-6337

Fax: +49 7364 20-3870

Email: [info.metrology.de@zeiss.com](mailto:info.metrology.de@zeiss.com)

Internet: [www.zeiss.de/imt](http://www.zeiss.de/imt)

**Carl Zeiss**

**Industrial Metrology, LLC**

6250 Sycamore Lane North

Maple Grove, MN 55369/USA

Phone: +1 763 744-2400

Fax: +1 763 533-0219

Email: [info.metrology.us@zeiss.com](mailto:info.metrology.us@zeiss.com)

Internet: [www.zeiss.com/metrology](http://www.zeiss.com/metrology)

# InfiniteFocusSL

As fast and intuitive as 3D surface measurement can be

InfiniteFocusSL is a cost efficient optical 3D measurement system for easy, fast and traceable measurement of form and finish on micro structured surfaces. Users measure both form and roughness of components with only one system. In addition, color images with high contrast and depth of focus are achieved. The long working distance of up to 33mm in combination with its measurement field of 50mm x 50mm allows a wide range of applications. Measurements are achieved in seconds and features, such as a coaxial laser for quick and easy focusing, further increase usability. With an automation interface, InfiniteFocusSL is also applied for fully automatic measurement in production.



Real3D Rotation Unit G2



AdvancedInsertGrip



InsertGrip G2



ToolGrip



## GENERAL SPECIFICATIONS

<b>Positioning volume (X x Y x Z)</b>	RL objectives: mot.: 50 mm x 50 mm x 155 mm (Z: 25 mm mot., 130 mm man.) = 387500 mm <sup>3</sup> SXRL/AXRL objectives: mot.: 50 mm x 50 mm x 120 mm (Z: 25 mm mot., 95 mm man.) = 300000 mm <sup>3</sup>
<b>Max. specimen weight</b>	4 kg, more on request

## OBJECTIVE SPECIFIC FEATURES

Objective magnification (*)		10x	20x	50x	2xSX	5xAX	10xAX	20xAX	50xSX
<b>Numerical aperture</b>		0.3	0.4	0.6	0.055	0.14	0.28	0.42	0.55
<b>Working distance</b>	mm	17.5	16	10.1	34	34	33.5	20	13
<b>Lateral measurement area (X,Y) (X x Y)</b>	mm mm <sup>2</sup>	2 4	1 1	0.4 0.16	10 100	3.61 13.03	2 4	1 1	0.4 0.16
<b>Ext. lat. measurement area (X,Y) (X x Y)</b>	mm mm <sup>2</sup>	50 2500							
<b>Measurement point distance</b>	µm	1	0.5	0.2	5	2	1	0.5	0.2
<b>Calculated lateral optical limiting resolution</b>	µm	1.09	0.82	0.54	5.93	2.33	1.17	0.78	0.59
<b>Finest lateral topographic resolution</b>	µm	2	1	0.64	10	4	2	1	0.64
<b>Measurement noise</b>	nm	40	20	10	1240	165	45	25	15
<b>Vertical resolution</b>	nm	100	50	20	3500	460	130	70	45
<b>Vertical measurement range</b>	mm	16	15	9	25	25	25	19	12
<b>Measurement speed</b>		≤ 1.7 million measurement points/sec.							
<b>Accessibility</b>	°	31	29	19	40	51	51	39	26

(\*) Objectives with longer working distance available upon request

## RESOLUTION AND APPLICATION SPECIFICATIONS

Objective magnification		10x	20x	50x	2xSX	5xAX	10xAX	20xAX	50xSX
<b>Min. measurable height</b>	nm	100	50	20	3500	460	130	70	45
<b>Max. measurable height</b>	mm	16	15	9	25	25	25	19	12
<b>Height step accuracy (1 mm)</b>	%	0.1							
<b>Max. measurable area</b>	mm <sup>2</sup>	2500							
<b>Max. measurable profile length</b>	mm	50							
<b>Min. measurable roughness (Ra)</b>	µm	0.3	0.15	0.08	n.a.	n.a.	0.45	0.25	0.15
<b>Min. measurable roughness (Sa)</b>	µm	0.15	0.075	0.05	n.a.	n.a.	0.25	0.1	0.08
<b>Min. measurable radius</b>	µm	5	3	2	20	10	5	3	2
<b>Min. measurable wedge angle</b>	°	20							
<b>Max. measurable slope angle</b>	°	87							

## ACCURACY

<b>Flatness deviation</b>	2 mm x 2 mm with 10x objective	U = 0.1 µm
<b>Max. deviation of a height step measurement</b>	height step 1000 µm height step 100 µm height step 10 µm height step 1 µm	E <sub>Uni: St: ODS, MPE</sub> = 1 µm, σ = 0.1 µm E <sub>Uni: St: ODS, MPE</sub> = 0.4 µm, σ = 0.05 µm E <sub>Uni: St: ODS, MPE</sub> = 0.3 µm, σ = 0.025 µm E <sub>Uni: St: ODS, MPE</sub> = 0.15 µm, σ = 0.01 µm
<b>Profile roughness</b>	Ra = 0.5 µm	U = 0.04 µm, σ = 0.002 µm
<b>Area roughness</b>	Sa = 0.5 µm	U = 0.03 µm, σ = 0.002 µm
<b>Distance measurement</b>	XY up to 2 mm	E <sub>Bi: Tr: ODS, MPE</sub> = 0.8 µm
<b>Wedge angle</b>	β = 70-110 °	U = 0.15 °, σ = 0.02 °
<b>Edge radius</b>	R = 5 µm - 20 µm R > 20 µm	U = 1.5 µm, σ = 0.15 µm U = 2 µm, σ = 0.3 µm

E<sub>Uni: St: ODS, MPE</sub> & E<sub>Bi: Tr: ODS, MPE</sub> conform to ISO 10360-8

For Sales, Service & Spares contact:  
**Optimax**  
Imaging Inspection Measurement  
Michael Francis House • 3 Trimbush Way  
Market Harborough • Leicestershire • LE16 7XY  
Registered in England No. 5562754  
VAT No. 780 4974 94

**Fair Data Sheet**  
Specifications in blue mark Alicon specific values.