

## Evaluación de macro y micro geometrías en Patrones de Fabricación Aditiva mediante Tomografía Computarizada

D. Gallardo<sup>(1)</sup>, L.C. Díaz-Pérez<sup>(1)</sup>, J.A. Albajez<sup>(1)</sup>,  
J.A. Yagüe-Fabra<sup>(1)</sup>, R. Jiménez<sup>(2)</sup> y M. Torralba<sup>(2)</sup>.

<sup>(1)</sup>Grupo de Ingeniería de Fabricación y Metrología Avanzada (GIFMA), Instituto de Investigación en Ingeniería de Aragón (I3A), Universidad de Zaragoza.  
Mariano Esquilador s/n, 50018, Zaragoza, España.

<sup>(2)</sup>Centro Universitario de la Defensa.

Ctra. Huesca s/n, 50090, Zaragoza, España.

Correo electrónico: [dgallardo@unizar.es](mailto:dgallardo@unizar.es). Teléfono: (34) 976 76 18 95.

**RESUMEN:** La tomografía computarizada de rayos X (XCT) ha supuesto un avance en la metrología industrial debido a su capacidad para caracterizar tanto macro geometrías (diámetros, distancias, longitudes) como micro geometrías (características superficiales), siendo un método de inspección no destructivo que permite evaluar partes internas de las piezas, incluso la porosidad del material. Para la evaluación de sus capacidades se emplean patrones de referencia calibrados previamente. En este estudio se ha diseñado un patrón para su producción en diferentes tecnologías de fabricación aditiva polimérica, incluyendo macro y micro geometrías. Algunos de los elementos se encuentran ocultos con un objetivo: poder ser caracterizados tanto por dispositivos tradicionales (descubiertos) como por tomografía computarizada (cubiertos, como partes internas e inaccesibles físicamente). El diseño ha sido evaluado mediante instrumentos diferentes a la XCT y, mediante el análisis de los resultados, se han realizado estudios complementarios de algunas características particulares con el objetivo de detectar posibles fuentes de error y optimizar la pieza en un futuro rediseño.

### 1. INTRODUCCIÓN

#### 1.1.- Antecedentes y justificación

En la metrología industrial actual existe una gran variedad de sistemas para la caracterización de piezas y mecanismos, tanto para la evaluación de macro geometrías (elementos tales como cilindros, esferas, planos, etc. y sus dimensiones, o distancias entre distintos elementos) como de micro geometrías (calidad superficial o rugosidad, microelementos). La limitación principal reside en la imposibilidad de medir ambos tipos de geometrías con el mismo dispositivo: para macro geometrías se emplean instrumentos como las máquinas de medición por coordenadas (MMC) capaces de tomar mediciones muy precisas y con una incertidumbre reducida, pero con grandes limitaciones para evaluar elementos con dimensiones menores a 1 mm. Por otra parte, los instrumentos utilizados para micro geometrías (microscopios electrónicos, confocales o microscopios de variación focal) poseen una resolución de micrómetros e incluso nanómetros, pero el área que pueden caracterizar es muy reducida (apenas unos milímetros). Además, todos los dispositivos coinciden en la imposibilidad de evaluar elementos no visibles, ya sean instrumentos con o sin contacto.

Por otra parte, la evolución de las tecnologías de fabricación aditiva (AM) han supuesto el desarrollo de piezas cada vez más complejas, con superficies y formas libres, elementos internos (algunos sin acceso al exterior) e incluso estructuras en celosía, que permiten hacer diseños de igual o mayor robustez que con otras tecnologías de fabricación, pero con un mayor aprovechamiento del material. La complejidad añadida a los nuevos diseños supone un reto para la metrología, ya que crea la necesidad de dispositivos que sean capaces de caracterizar dimensionalmente estas geometrías innovadoras [1].

En este aspecto, la tomografía computarizada de rayos X (XCT) se erige como una solución a las limitaciones metrológicas de los dispositivos ya existentes y a las exigencias de las nuevas piezas en cuanto a caracterización dimensional [2]. Esta tecnología se basa en la adquisición de imágenes 2D de rayos X del objeto a medir, colocado en un plato rotatorio; con estas imágenes tomadas en 360°, es posible realizar una reconstrucción del volumen en 3D. En este volumen obtenido es posible evaluar tanto macro como micro geometrías (dependiendo de la resolución del sistema), además de partes internas ya que los datos volumétricos en forma de vóxeles no sólo registran la superficie, sino también el interior del objeto.

Esta tecnología ha sido usada previamente en aplicaciones médicas para la realización de diversas pruebas, o en la detección de defectos internos de piezas ya que se trata de un método no destructivo. Para estos fines, su precisión no es determinante ya que son evaluaciones cualitativas; sin embargo, en metrología industrial, una alta exactitud y una baja incertidumbre de medida son requisitos indispensables. Este último parámetro es una de las principales limitaciones de la XCT y el más investigado [3-8], ya que se han detectado numerosas fuentes de incertidumbre tanto en la medición del objeto como en el postprocesado del volumen.

Debido al reciente uso de la XCT en aplicaciones metrológicas, la normativa específica para calibrar estos dispositivos se encuentra poco desarrollada. Por ello, se diseñan patrones de referencia para realizar estas calibraciones y poder estimar la incertidumbre de los instrumentos, habitualmente mediante el método de sustitución especificado en la normativa ISO 15530-3 [9].

En este artículo se presentan los resultados de la evaluación del patrón multigeometría realizado previamente [10] en el cual se incluían una serie de macro y micro geometrías para ser evaluadas mediante XCT. En este estudio se propone un rediseño del patrón, optimizando el diseño previo y en base a la primera evaluación, así como aplicando nuevos conocimientos obtenidos mediante estudios paralelos [11], tanto acerca de materiales adecuados como de metodología de medición.

## **1.2.- Estado del arte en patrones de referencia**

En este subapartado se resume el estudio de otros patrones de referencia diseñados previamente con un propósito similar al diseño propio, así como sus características principales y puntos en común encontrados. Además, un resumen de algunos de ellos se puede ver en la tabla 1.

Como se indica previamente, estos patrones de referencia permiten testear las capacidades de los dispositivos de tomografía computarizada y, por tanto, muchos de los artefactos estudiados se han diseñado específicamente para esta tecnología [12, 13] incluso teniendo en cuenta las complejidades alcanzables por la fabricación aditiva [14, 15]. Además, otras piezas con un propósito inicial distinto [16] han resultado de utilidad como patrones calibrados debido a su precisión y a la calidad de sus materiales.

En cuanto a las características de los patrones, destacan las macro geometrías simples como cilindros, esferas y planos para la evaluación tanto de sus dimensiones y errores de forma como de las distancias entre distintos elementos [12, 14, 15]. En general, se incluye un número limitado de elementos con objetivos de medición muy concretos, aunque en algunos casos como el NIST Standard [15] se recogen un rango amplio de geometrías, incluso con áreas superficiales en las que poder estudiar su rugosidad. Por otro lado, algunos patrones están dedicados específicamente a micro geometrías [13] o a la evaluación y detección de porosidades [17]. Estos elementos están presentes como geometrías internas.

Los materiales empleados generalmente son de calidad y una alta precisión [12, 15, 16], aunque debido a la mayor incertidumbre general de los dispositivos, otros materiales de menor coste (metales y polímeros más comunes) también resultan aceptables para este tipo de piezas.

Grupo de investigación	Patrón	Geometrías	Material
Universidad de Padua, Italia	CT Tetrahedron [12]	Esferas y barras cilíndricas	Rubí y fibra de carbono
Universidad de North Carolina en Charlotte, USA	Silicon Sheets Cube [13]	Láminas encapsuladas	Silicona y cristal
National Institute of Standards and Technology (NIST), USA	NIST Standard [14]	Varias geometrías en una placa base cuadrada	ABS
Universidad de Padua, Italia	Artificially Porous Element [17]	Base cilíndrica y cilindros desmontables	Aluminio

Tabla 1: Ejemplos de patrones de referencia para XCT

## 2.- METODOLOGÍA Y DESARROLLO

El primer diseño realizado para el patrón multigeometría [10] se puede observar en la Fig. 1.

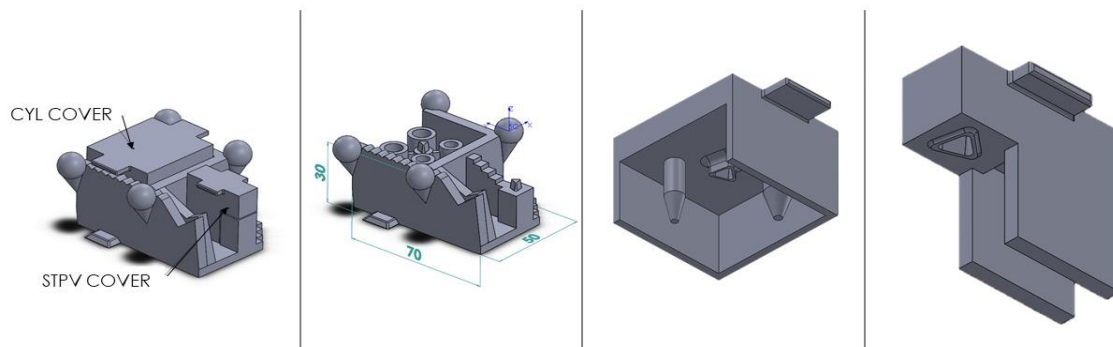
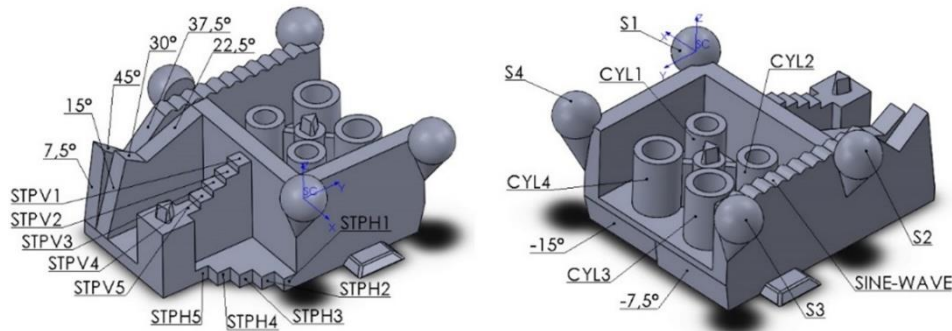


Fig. 1: Primer diseño del patrón multigeometría desmontable de 3 cuerpos

El patrón incluye una serie de esferas, cilindros y escalones (verticales y horizontales) con los que evaluar diámetros, errores de forma y diferentes tipos de distancias (plano-plano, entre centros de esferas y entre cilindros); mediante las dos tapas registrables en el cuerpo principal, algunos de estos elementos quedan ocultos para su análisis como geometría interna mediante XCT, pero evaluables por los instrumentos de referencia al retirar las coberturas. Además, se incluyen diferentes perfiles para la caracterización de la rugosidad superficial, en forma de rampas inclinadas (aprovechando la tecnología capa por capa de la fabricación aditiva) y de un perfil senoidal. Por último, para alinear la pieza dentro de los instrumentos de medición se emplean las esferas como sistema de referencia, con origen en S1.

En la Fig. 2 se puede ver la distribución de las geometrías evaluadas.



**Fig. 2: Geometrías evaluadas en el primer diseño**

Se fabricaron dos prototipos con dos tecnologías diferentes: Fused Deposition Modelling (FDM) y Polyjet, y se tomaron mediciones previas al tomografiado con dos instrumentos de referencia: CMM ZEISS PMC-876 CNC para las macro geometrías y FVM InfiniteFocusSL of Alicona para los perfiles de rugosidad.

Basándonos en los resultados obtenidos en la evaluación del primer diseño (apartado 3) se han planteado una serie de modificaciones tanto en la forma y las geometrías del patrón como en la metodología a seguir.

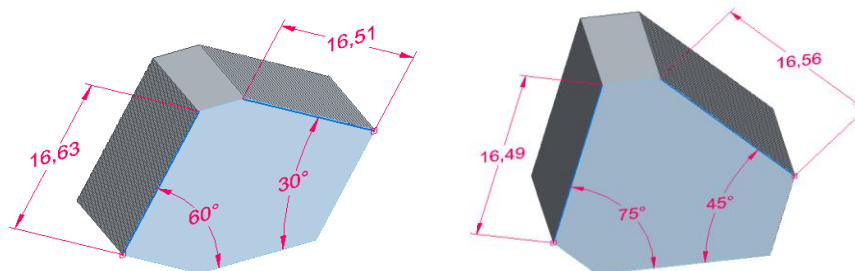
El primer estudio paralelo ha sido la caracterización de distintas superficies de rugosidad teórica conocida mediante el mismo instrumento de referencia empleado previamente (FVM InfiniteFocusSL of Alicona). Se han diseñado una serie de patrones (Fig. 3) con rampas inclinadas que, fabricados por diferentes tecnologías AM y variando el parámetro del espesor de capa, han dado lugar a una serie de perfiles con rugosidades teóricas calculadas mediante el procedimiento indicado en [18].

Para determinar los valores teóricos se utiliza la siguiente ecuación:

$$Ra = \frac{1000t}{4} * \left| \frac{\cos((90 - \theta) - \emptyset)}{\cos \emptyset} \right|$$

**Ecuación 1: Cálculo de Ra teórico.**

En el que t es el espesor de capa,  $\theta$  es el ángulo de la rampa y  $\emptyset$  es el ángulo de la pared vertical de la capa (en el caso teórico, se considera  $\emptyset=0$  ya que la pared es totalmente vertical).

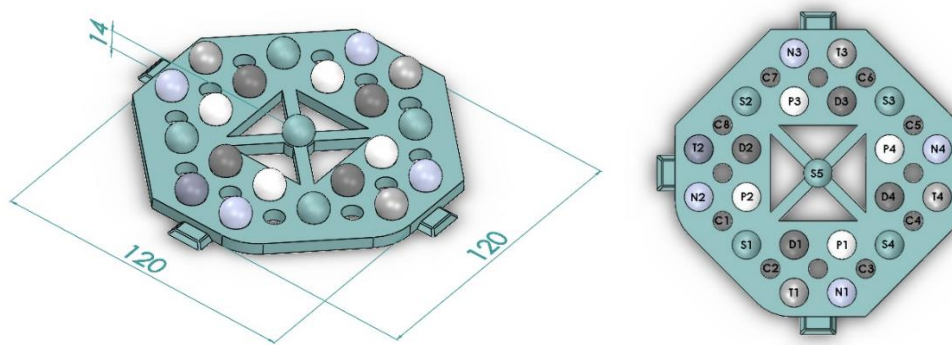


**Fig. 3: Patrones diseñados para el estudio de rugosidad superficial**

El segundo estudio paralelo se ha centrado en la evaluación de la estabilidad dimensional de esferas calibradas poliméricas para sustituir a las esferas impresas que forman el sistema de alineamiento.

Las esferas calibradas seleccionadas están fabricadas de 4 materiales poliméricos de distintas características: Delrin (POM), polipropileno, teflón y nylon. El diámetro de las esferas calibradas coincide con el de las esferas impresas del primer diseño del patrón multigeometría ( $\varnothing$  12 mm), con una tolerancia sobre el diámetro de  $\pm 25 \mu\text{m}$  y una tolerancia formal de  $\pm 12 \mu\text{m}$ .

Se ha diseñado un patrón específico para su evaluación consistente en una placa base fabricada por tecnología Polyjet, cuyo material es una resina fotopolimerizada Rigur RGD450, sobre la cual se colocan 4 grupos de 4 esferas cada uno, cada grupo con una esfera por material. Además, en la placa base se incluyen una serie de esferas impresas para realizar una comparativa con las calibradas, y varios huecos cilíndricos que, además de ser caracterizados, permiten aligerar la pieza y ahorrar material. El diseño se puede ver en la Fig. 4.



**Fig. 4: Dimensiones y distribución de los elementos en el patrón de esferas**

La nomenclatura de los elementos es la siguiente: S para las esferas impresas, T para teflón, D para Delrin, P para polipropileno, N para nylon y C para huecos cilíndricos. El nº que los acompaña es el nº de grupo o de elemento (caso de los huecos cilíndricos).

### 3.- RESULTADOS

Tras la evaluación del patrón inicial, primero mediante los instrumentos de referencia y después por tomografía computarizada, se han encontrado amplias desviaciones producidas en las distancias entre cilindros y esferas (200  $\mu\text{m}$  en las piezas FDM y 120  $\mu\text{m}$  en las piezas Polyjet aprox.) entre las medidas de referencia y las tomografías. Esto, junto con el elevado error de forma de estos elementos, ha dado lugar al estudio paralelo mediante esferas calibradas, para comprobar la relación de estos fenómenos.

En la Tabla 2 se muestran los resultados más relevantes: las desviaciones de las mediciones de las tomografías respecto a las mediciones de referencia en las esferas. La relevancia de estos datos reside en que son las geometrías más significativas y cuyo valor debe ser el más sólido y, por tanto, con menor desviación. En cuanto al error de forma indicado, su valor es absoluto respecto al nominal. Se incluye también una comparativa con las mediciones del patrón de esferas, para comprobar el efecto del error de forma en las medidas de distancias y diámetros. Los valores nominales de las distancias entre esferas están entre 40 y 75 mm.

Por otra parte, los resultados de las distancias entre escalones (plano-plano) resultan menos fiables debido a su gran dependencia de la superficie determinada. Sus desviaciones entre las medidas de referencia y las tomografías están entre 30 y 60  $\mu\text{m}$  para ambas tecnologías; estos

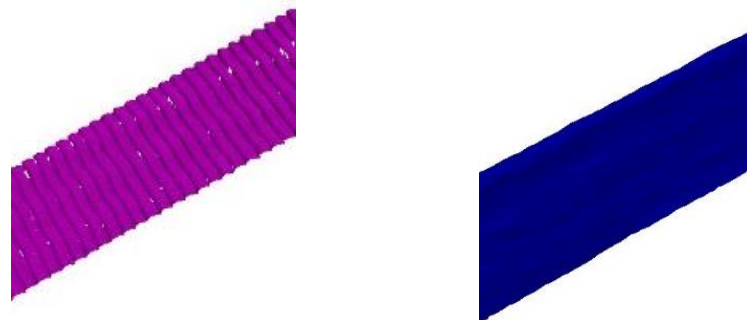
valores resultan demasiado grandes teniendo en cuenta que las distancias entre elementos son cortas (2-4 mm).

Valor ( $\mu\text{m}$ )	Patrón multigeometría		Patrón esferas	
	FDM	Polyjet	Esf. calibradas	Esf. impresas
Error forma	229,7	97,3	7,9	62,9
Error en Diámetros	81,3	28,5	4,7	33,1
Error en Distancias	214	123	12,5	22,9

**Tabla 2: Valores registrados en la evaluación de esferas.**

Los valores de las desviaciones son en todo momento positivos, siendo el valor absoluto registrado en las tomografías siempre mayor que en las medidas de referencia. Como se puede observar, el aumento del error de forma tiene un impacto en las desviaciones de las distancias entre elementos. Además, la introducción de las esferas calibradas permite obtener unas desviaciones más aceptables para poder considerar la pieza como patrón calibrado.

Para la evaluación de la rugosidad se ha seguido la normativa ISO 4288:1996 [19]. Debido al excesivo tamaño de vóxel obtenido mediante el tomografiado del primer patrón multigeometría (155  $\mu\text{m}$  aprox), las superficies extraídas no tienen la suficiente resolución como para evaluar directamente los parámetros de rugosidad (Fig. 5). Sin embargo, se ha analizado el error de forma de las rampas en la tomografía para comprobar que la rugosidad de la superficie afecta a este parámetro. Los resultados se pueden ver en la Tabla 3. En ella, se detallan los valores teóricos calculados mediante la Ecuación 1, los resultados de Ra obtenidos en Alicona y los errores de forma de las rampas en XCT.



**Fig. 5: Comparativa de la superficie extraída por Alicona (izq) y por tomografía (der).**

Geometría	Ra Teórico ( $\mu\text{m}$ )		Ra Alicona ( $\mu\text{m}$ )		Error forma tomografías ( $\mu\text{m}$ )	
	FDM	Polyjet	FDM	Polyjet	FDM	Polyjet
Rampa 30°	43,3	3,5	43,6	2,8	64	42
Rampa 45°	35,4	2,8	31,4	4,8	51	36
Rampa 75°	12,9	1,1	20,9	10,5	69	46

**Tabla 3: Comparativa de resultados teóricos y experimentales de las rampas**

Para los cálculos teóricos se ha tenido en cuenta el espesor de capa empleado para fabricar todas las piezas:  $t=200\ \mu\text{m}$  en las piezas fabricadas por FDM y  $t=16\ \mu\text{m}$  en las piezas fabricadas por Polyjet.

Se puede observar que, mientras las rampas de  $30^\circ$  y  $45^\circ$  siguen una tendencia más o menos similar, conforme aumenta el ángulo de inclinación de la rampa las desviaciones son mucho mayores; una de las posibilidades principales es el defecto de fabricación de la propia tecnología en geometrías con inclinaciones tan grandes. Por otra parte, debido al valor de rugosidad tan bajo de las piezas fabricadas mediante Polyjet, al límite de resolución de los propios instrumentos y al postprocesado necesario de la pieza que puede dañar la superficie, los resultados registrados en Alicona de la pieza de Polyjet son menos predecibles frente al teórico.

La solución propuesta para las piezas de Polyjet será generar rugosidades mayores mediante un perfil con una altura de escalón múltiplo del espesor de capa; se está trabajando con valores de  $96$  y  $192\ \mu\text{m}$ .

#### **4.- CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO**

En este estudio se han realizado las primeras evaluaciones del patrón diseñado previamente [10] y se han encontrado una serie de problemas a los que se les ha buscado solución mediante estudios paralelos, tanto para mejorar la calidad de los resultados como para implantar una metodología de medición adecuada para diseños futuros.

Respecto a los resultados de las evaluaciones, se ha podido comprobar que para mejorar los resultados de las comparaciones entre las medidas de referencia y las tomografías es necesario que las geometrías empleadas para alinear la pieza tengan la mayor precisión posible, y en este caso se ha conseguido mediante la inclusión de elementos externos calibrados.

Por otra parte, un tamaño de vóxel excesivamente grande puede dificultar en gran medida la apreciación de la rugosidad superficial, ya que la resolución resulta insuficiente. Sin embargo, los efectos que tiene la rugosidad superficial son notorios en el error de forma de la superficie.

Como trabajo futuro, se aplicarán los conocimientos aprendidos en este estudio en optimizar el diseño del patrón multigeometría para volver a evaluarlo mediante tomografía computarizada y, previa y posteriormente, mediante los instrumentos de referencia para comprobar los cambios dimensionales. Adicionalmente, en cuanto se consiga validar el proceso, se introducirán, ya sea como rediseño del patrón o en una pieza nueva, geometrías más complejas como superficies libres y estructuras en celosía para evaluar las capacidades de la XCT como tecnología y estimar su incertidumbre de medida de forma más precisa.

#### **5.- REFERENCIAS**

- [1] Thompson A, Maskery I, Leach. *X-ray computed tomography for additive manufacturing: a review*. Measurement Science and Technology 27 (7) p 072001. 2016.
- [2] Weckenmann A, Kramer P. *Computed tomography – new and promising chances in manufacturing metrology*. International Journal of Precision Technology 1 (3/4) pp 223-233. 2010.
- [3] Ferrucci M, et al. *Towards geometrical calibration of x-ray computed tomography systems—a review*. Measurement Science and Technology 26 (9) p 092003. 2015.
- [4] Kiekens K, Ye T, Welkenhuyzen F, Kruth JP, Dewulf W. *Uncertainty determination for dimensional measurements with computed tomography*. 2nd Conference on Industrial Computed Tomography pp 183–190. 2012.
- [5] Carmignato S, Balcon M, Zanini F. *Investigation on the accuracy of CT measurements for wear testing of prosthetic joint components*. 4th Conference on Industrial Computed Tomography pp 209-216. 2014.

- [6] Yagüe-Fabra JA, et al. *A 3D edge detection technique for surface extraction in computed tomography for dimensional metrology applications*. CIRP Annals 62 (1) pp 531–4. 2013.
- [7] Welkenhuyzen F, et al. *Industrial computer tomography for dimensional metrology: overview of influence factors and improvement strategies*. Proceedings of the 4th international conference on optical measurement techniques for structures and systems pp 401–10. 2009.
- [8] Ontiveros S, et al. *Dimensional measurement of micro-moulded parts by computed tomography Measurement*. Science and Technology 23 (12) p 125401. 2012.
- [9] Geometrical product specifications (GPS). Coordinate measuring machines (CMM): Technique for determining the uncertainty of measurement - Part 3: Use of calibrated workpieces or measurement standards (ISO 15530-3:2011).
- [10] Albajez J, Nuño S, Díaz LC, Gallardo D, Yagüe J, Jiménez R, Torralba M. *Reference standard for the uncertainty estimation of X-ray Computed Tomography measurements of complex macro- and micro- geometries*. 9th Manufacturing Engineering Society International Conference. Gijón, 2021.
- [11] Gallardo D, Díaz LC, Albajez J, Yagüe J, Jiménez R, Torralba M. *Evaluación de la estabilidad dimensional de esferas calibradas poliméricas para su aplicación en un patrón de referencia para tomografía computarizada (CT)*. Jornada de Jóvenes Investigadores del I3A, vol. 10 (Actas de la XI Jornada de Jóvenes Investigadores del I3A). ISSN 2341-4790. 2022.
- [12] Carmignato S. *Accuracy of industrial computed tomography measurements: Experimental results from an international comparison*. CIRP Annals. Manufacturing Technology 61 pp 491–494. 2012.
- [13] Thousand JD, Smith ST. *A direct silicon bonded reference object for performance assessment of tomography systems*. Precision Engineering 58 pp 16-24. 2019.
- [14] Rivas Santos VM, et al. *Design and characterisation of an additive manufacturing benchmarking artefact following a design for metrology approach*. Additive Manufacturing 32 p 100964. 2020.
- [15] Moylan S, Slotwinski J, Cooke A, Jurens K, Donmez MA. *An Additive Manufacturing Test Artefact*. Journal of Research of NIST 119 pp 429–459. 2014.
- [16] Ontiveros S, et al. *Dimensional measurement of micro-moulded parts by computed tomography Measurement Science and Technology*. 23 (12) p 125401. 2012.
- [17] Hermanek, P and Carmignato, S. *Reference object for evaluating the accuracy of porosity measurements by X-ray computed tomography*. Case Stud. Nondestruct. Test. Evaluation. 6, 122-127. 2016.
- [18] Ibrahim D, Ding S, and Sun S. *Roughness Prediction for FDM Produced Surfaces*. International Conference Recent trends in Engineering & Technology (ICRET'2014), Batam, Indonesia. 2014.
- [19] Geometrical Product Specifications (GPS). Surface texture: Profile method. Rules and procedures for the assessment of surface texture (ISO 4288:1996).

## 6.- AGRADECIMIENTOS

Este estudio ha contado con la financiación del proyecto “Metrología por fusión de datos Multiescala para la caracterización de piezas complejas” (MultiMet ref: RTI2018-097191-B-I00) y de una Ayuda para Contratos Predoctorales para la Formación de Doctores – FPI 2019 (ref: PRE2019-089465).