

METROLOGÍA DIMENSIONAL PARA LA EVALUACIÓN DE LA CALIDAD INTERNA DE PIEZAS DE ALUMINIO MEDIANTE TOMOGRAFÍA COMPUTARIZADA

Ibon Holgado⁽¹⁾, Naiara Ortega^(1,2), José A. Yagüe-Fabra⁽³⁾, Herminso Villarraga-Gómez⁽⁴⁾

⁽¹⁾ CFAA, Parque tecnológico de Bizkaia, 202, 48170 Zamudio, España
Teléfono: 946 018 492; Correo electrónico: ibon.holgado@ehu.eus

⁽²⁾ Departamento de Ing. Mecánica, EIB, Plaza Ing. Torres Quevedo 1, 48013 Bilbao, España

⁽³⁾ I3A, Universidad de Zaragoza, María de Luna 3, E-50018 Zaragoza, España

⁽⁴⁾ Carl Zeiss Industrial Metrology, LLC, Wixom, MI, EE. UU.

RESUMEN: Este trabajo propone el empleo de un objeto de referencia de diseño propio para la evaluación de la precisión de las mediciones de defectos internos en piezas de aluminio mediante Tomografía Computarizada. Para ello, cada medición se asocia con su correspondiente estimación de la incertidumbre empleando un proceso derivado de la norma ISO15530-3. Además se analiza la influencia del espesor acumulado en la precisión de las mediciones. Tras el análisis propuesto se comparan los resultados de incertidumbre expandida (U_{MP}) en defectos internos con distinto error de forma contenidos en diferentes espesores acumulados.

1. INTRODUCCIÓN

La evolución tecnológica está proporcionando sistemas avanzados de fabricación con gran precisión que son capaces de generar una producción de piezas complejas más económica, funcional y eficiente, como es el caso de la fabricación aditiva (FA). Estas piezas, de complejas y singulares geometrías, requieren mediciones dimensionales tanto externas como internas para su caracterización. La Tomografía Computarizada (TC), con su gran avance en el desarrollo de equipos y software [1], es una tecnología no destructiva cada vez más aceptada para realizar mediciones dimensionales.

Sin embargo, los resultados cuantitativos obtenidos mediante TC están influenciados por un gran número de fuentes de error, provocando que la precisión de las mediciones basadas en TC se vea afectada por varios factores de incerteza. En consecuencia, es necesario desarrollar procedimientos de medición coherentes y verificar el rendimiento de los sistemas de TC para apoyar el control de calidad de la producción de FA. Estos deben incluir procedimientos para la compensación de errores y la estimación de incertidumbres en las medidas, para que así la TC pueda considerarse una tecnología precisa y fiable [2].

En el presente trabajo se propone un procedimiento novedoso para la medición trazable mediante TC de defectos internos en componentes fabricados mediante *Powder Bed Fusion* (PBF), técnica dominante de FA para producir estructuras metálicas impresas en 3D de alta calidad. Para ello se diseñará, fabricará y calibrará un objeto de referencia (patrón). El patrón utilizado será de aleación de aluminio AW5083 y contendrá defectos internos con diferentes geometrías, fabricados intencionadamente, para simular defectos que comúnmente aparecen en los componentes tratados con PBF. Para cada defecto, se proporcionará un método novedoso de evaluación de porosidad mediante mediciones locales. Cada medición será asociada con su correspondiente estimación de incertidumbre específica. Los resultados preliminares pretenden mostrar que el aseguramiento de la trazabilidad podría ser realizable cuando se utiliza la metodología propuesta.

1.2 Tomografía computarizada en la fabricación aditiva (FA)

Las tecnologías de fabricación aditiva (FA) proporcionan beneficios potenciales a varias industrias de alto valor como la aeroespacial, la aeronáutica y la automoción, principalmente

debido a la capacidad de diseño libre. Dada la naturaleza de los procesos aditivos, es posible fabricar piezas ligeras con geometrías muy complejas que antes eran imposibles de producir con los procesos de fabricación sustractiva convencionales [3]. Sin embargo, se está llevando a cabo un gran esfuerzo de investigación para reducir las limitaciones de las técnicas de FA, como es el caso de la velocidad de producción, las desviaciones dimensionales y la aparición de defectos internos no deseados [4].

Concretamente, la porosidad o las grietas son defectos internos muy comunes inherentes a los parámetros de procesamiento incorrectos de la FA. Para sobreponerse a estas limitaciones, la importancia de una evaluación precisa de la porosidad es cada vez mayor y, en consecuencia, muchas industrias ya están desarrollando sus propias directrices y las antiguas normas de fundición de metales se están adaptando a los procesos de FA [3]. No obstante, es común evaluar la porosidad únicamente por su contenido global (ya sea 2D o 3D) y muchos estudios han demostrado que esto no es eficiente. *Lambert et al.* [5] aseguran que la calificación eficiente y fiable del proceso de FA requiere la evaluación local de los defectos internos, incluyendo el volumen, forma y tamaño. Sin embargo, hasta la fecha, este concepto ha recibido muy poca atención en la literatura.

La tomografía computarizada de rayos-X (TC) es una técnica de inspección no destructiva que puede proporcionar información sobre la estructura interna de las piezas de FA y se postula como el mejor método para la evaluación de la porosidad [3]. Esta técnica utiliza el poder de penetración de los rayos X para obtener una secuencia de radiografías (imágenes 2D) del objeto tomadas desde varias posiciones diferentes a lo largo de un giro completo del objeto a escanear. A continuación, se utiliza un algoritmo de reconstrucción para obtener una representación digital en 3D, y en escala de grises, de la estructura interna y externa del objeto. Esta representación es la tomografía y puede analizarse cuantitativamente y cortarse virtualmente en cualquier dirección y localización [6].

Sin embargo, debido a los numerosos factores que influyen en el proceso de escaneado TC, algunos aspectos de la precisión e incertidumbre de las mediciones TC son objeto de una investigación continua [7]. Por lo tanto, actualmente existe una necesidad de una evaluación completa de las incertidumbres de la medición para que esta técnica se convierta en una tecnología de inspección aceptada por la industria.

2. DESARROLLO/DESCRIPCIÓN

El uso de objetos de referencia (patrones) es una solución común para la trazabilidad y la calibración de los procesos de medición de las muestras realizadas por FA [8]. En particular, los objetos de referencia con características introducidas artificialmente están muy extendidos en la verificación de la precisión de las mediciones de los sistemas TC [9]. Como se ha mencionado anteriormente, los sistemas TC son capaces de medir características interiores, por lo que algunos de estos objetos de referencia están orientados a la medición de defectos internos. En la **Tabla 1** se muestra un resumen de alguno de los patrones más representativos diseñados para la calibración de piezas con defectología interna, indicando el tamaño y material del que están fabricados [9, 10, 11, 12, 13].

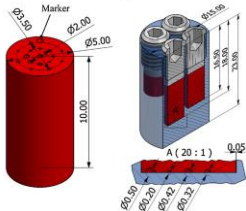
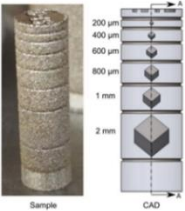
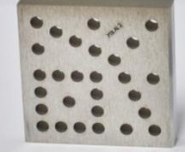
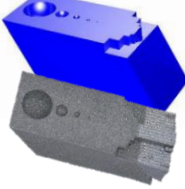

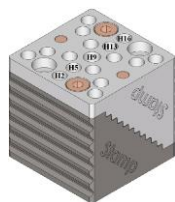


Patrón	Reference object with artificial porosities[9] 	Hollow cube artefact[10] 	Hole plate[13] 	Internal cavities artefact[12] 
Material	Aluminio AW6005A	Acero inoxidable	Acero y aluminio	Ti6Al4V y PA
Tamaño(mm)	L10 Ø15 y Ø5 pines. Defectos desde Ø0,5 hasta Ø0,2	L15 Ø4.1. Defectos desde 2×2×2 hasta 0,2×0,2×0,2	6×6×1 o 48×48×8 28 agujeros de Ø4	Máx. dimensión 20. Agujeros desde Ø10 hasta Ø0,250
Patrón	Artificial defect artefacts[11] 	Multi-material hole cube[13] 	Calotte cube[13] 	Stainless steel (SS) global shape artefact[13] 
Material	Aleación 718 y Ti64	PEEK, Cestic, Al y TI	Titanio	Acero inoxidable
Tamaño(mm)	20×20×45 y L30 Ø14. Defectos desde 1,8 hasta 0,1	30×30×30. Múltiples distancias uni/bi direccionales	10×10×10. 5×5 agujeros de Ø8	Múltiples dimensiones. Máx. dimensión 28

Tabla 1 Patrones más recientes utilizados para la calibración de piezas con defectología interna en TC

Sin embargo, a día de hoy en la literatura revisada no se han encontrado estudios que proporcionen una evaluación de la precisión de la porosidad de piezas de FA detectada por TC basada en geometrías internas calibradas, como el tamaño, la forma y el volumen. Por ejemplo, Hermanek et al. [10] plantean un patrón con defectos artificiales con formas regulares (semiesferas) y [13,14] proponen defectos regulares incluso accesibles por la superficie, ofreciendo un escenario no realista de los defectos internos de FA. Por otro lado, [11,12] plantean diseños de patrón con características internas que no pueden medirse con otro sistema de medición que proporcione trazabilidad.

2.1 Objeto de referencia

Este trabajo propone el empleo de un objeto de referencia de diseño propio para la evaluación de la precisión de las mediciones de la porosidad mediante TC. El objeto de referencia es un ensamblaje de varios componentes que, una vez montados, simulan un objeto con defectos internos. Todos sus componentes son fabricados en una aleación de aluminio, uno de los materiales más utilizados en la FA, que garantiza una fácil penetración de los rayos-X y que ofrece una buena estabilidad dimensional ($\alpha \approx 23,8\mu\text{m m}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$). El diseño desmontable cuenta con una serie de ajustes en forma de semicircunferencia que aseguran una unión mecánica y estabilidad metrología. Tanto el ensamble como el despiece puede observarse en la **Fig. 1**.

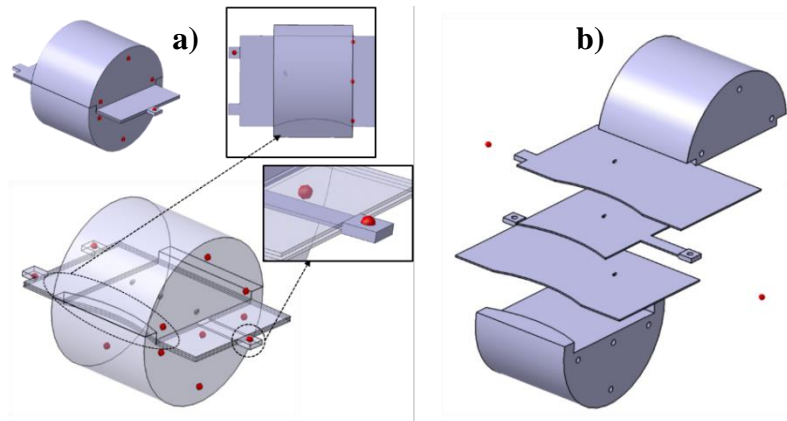


Fig. 1 a) Ensamble y b) despiece del patrón prototipo

Para verificar la estabilidad metrológica del ensamblaje y para realizar la calibración del *voxel size* previo a las mediciones TC, en cada componente se alojaron mediante adhesivo esferas de rodamiento de Al_2O_3 de grado 5 con diámetros de 4 mm y error de forma despreciable ($\pm 3 \mu\text{m}$). El adhesivo utilizado fue un cianoacrilato, el cual proporciona una excelente estabilidad dimensional durante su uso y aplicación [14]. Los agujeros en los que se alojan las esferas fueron previamente mecanizados con fresa de bola. Las distancias entre los centros de las esferas fueron calibradas previamente (medición unidireccional e independiente de los bordes) mediante una máquina de medición de coordenadas multisensor (MMC) Zeiss F-25 con error máximo permitido (MPE) igual a $(0,25 + L/666) \mu\text{m}$ (donde L es la longitud en mm).

La mayoría de los defectos internos en las piezas de FA se pueden clasificar como los debidos al atrapamiento de aire (casi esféricos) o a falta de fusión (geometrías irregulares). Por ello, cada una de las 3 placas que conforman el patrón contiene una geometría microtaladrada con diferente error de forma. Una de las placas se microtaladró con una geometría circular de 0,5 mm de radio, otra de las placas con una elipse de eje principal 0,550 mm y eje secundario de 0,456 mm y la última de las placas con una elipse de eje principal 0,600 mm y eje secundario de 0,417 mm, manteniendo la relación de área teórica constante en las 3 geometrías. El error de forma se definió con el método del círculo de mínimos cuadrados (LSC). El tamaño se definió como el diámetro del círculo obtenido por mínimos cuadrados.

Además, dentro del marco de este estudio se llevaron a cabo investigaciones adicionales sobre la influencia del espesor acumulado de material escaneado en la precisión de las mediciones TC. Para evaluar el espesor acumulado, teniendo en cuenta el espesor máximo penetrable para el aluminio [15], se diseñaron 3 patrones diferentes de 70 mm, 50 mm y 30 mm de diámetro. La longitud del patrón se definió en 110 mm para permitir un escaneo de todo el volumen con $130 \mu\text{m}^3$ de *voxel size*. El diámetro de los orificios microtaladrados se estableció en aproximadamente 1 mm y fueron realizados en placas de 1 mm de espesor (un orificio por placa), a fin de tener información suficiente en todos los casos evaluados. Cada defecto fue microtaladrado en diferentes posiciones de la línea central de cada placa tal y como se ve en la **Fig. 1**. En la **Fig. 2** se muestra el CAD y las TC de 3 patrones diferentes utilizados.

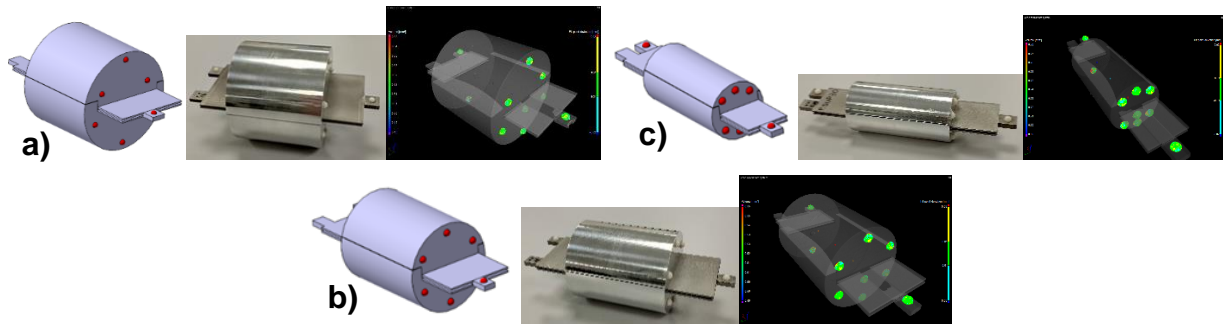


Fig. 2 Diseño de los patrones utilizados en el estudio a) $\varnothing 70\text{mm}$, b) $\varnothing 50\text{mm}$, c) $\varnothing 30\text{mm}$

Las piezas principales se fabricaron en un centro de mecanizado Yasda de ultraprecisión de 5 ejes (modelo YBM950V) y las placas que contienen los defectos, mediante electroerosión por hilo (WEDM) en una máquina ONA AX3. El diseño desmontable del objeto permite calibrar los defectos artificiales internos, los cuales se realizaron micro-taladrando cada placa mediante taladrado láser de percusión en una célula de marcado Trumark 5000 con un láser pulsado de hasta 2 ns y picos máximos de 10 kW de potencia.

2.2 Plan de medición

Para los escaneos TC se utilizó una estación digital de Rayos-X Electric X-Cube Compact de 5 ejes. Para el análisis de los resultados TC se utilizó el software VGStudio MAX 3.4 y el algoritmo VGDefX en modo interpolación 0.7. Los parámetros de escaneo (constantes en todos los análisis) se eligieron con el fin de obtener una potencia suficiente para penetrar en todos los ensamblajes sin saturar el detector, resultando en 175 kV de tensión, 3,4 mA de intensidad, 100 ms de tiempo de exposición y una combinación de 1 mm de Cu + 0,5 mm de Sn como filtros hardware para minimizar el *Beam Hardening*. El tamaño de foco utilizado fue 0,4 mm, la magnificación 1,525 y los patrones se escanearon en posición vertical pero ligeramente inclinados (1° - 4°).

Previo a todas las mediciones TC, para realizar la calibración del *voxel size*, se utilizaron las distancias calibradas entre los centros de las 5 esferas indicadas en la **Fig. 3** (C1, C2, C3, C4 y C5), en cada uno de los 3 patrones definidos en la **Fig. 2**. La disposición espacial de las esferas seleccionadas permitió evaluar al menos cinco distancias diferentes en distintas direcciones espaciales. Los factores de escala de *voxel size* (γ) correspondientes a cada una de las 5 distancias se determinaron como la relación entre la distancia calibrada y la adquirida mediante TC. Después, se utilizó una regresión lineal para obtener el γ correspondiente al mensurando evaluado (tamaño o error de forma). Esta operación se realizó en 5 escaneos con los mismos parámetros de escaneo y el factor de escala fue considerado como el valor medio. La desviación estándar multiplicada por un factor de seguridad de 1,2 fue considerada como la incertidumbre estándar asociada a la corrección del *voxel size* (u_v).

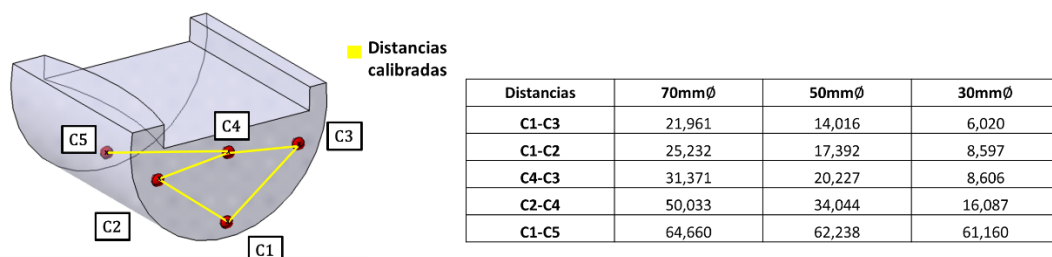


Fig. 3 Centro de esferas utilizadas para la calibración del *voxel size*

La incertidumbre expandida de las mediciones TC (U_{MP}) se evaluó mediante un proceso derivado de la norma ISO15530-3 [16]. Las magnitudes (mensurando) evaluadas de cada defecto son el tamaño, la forma y el volumen. La estimación de la incertidumbre expandida (U_{MP}) asociada a cada proceso de medición TC es definida mediante:

$$U_{MP} = k \cdot \sqrt{u_v^2 + u_{cal}^2 + u_p^2 + u_b^2} \quad (1)$$

Donde u_v es la incertidumbre estándar debida a la corrección del *voxel size*, u_{cal} la incertidumbre estándar debida a la calibración de los valores de referencia, u_p la incertidumbre estándar asociada a la repetitividad del proceso de medición TC y u_b la incertidumbre estándar asociada a la corrección de los errores sistemáticos (b) entre los valores calibrados y los valores TC. Cada mensurando fue medido 5 veces y la u_p fue considerada como la desviación estándar de las repetidas mediciones multiplicada por un factor de seguridad de 1,2 [16].

Existen diferentes enfoques para evaluar la incertidumbre del error sistemático b . Si el resultado de la medición no se corrige por el error sistemático, el error contribuye plenamente en la estimación de la incertidumbre expandida (U_{MP}) [16]. En este estudio, los errores sistemáticos sí fueron corregidos de los resultados de las mediciones TC, tal y como se expresa en la **ecuación 2**:

$$Y_{MP} = y_{MP} - b \pm U_{MP} \quad (2)$$

Donde Y_{MP} son los valores TC corregidos, y_{MP} los valores no corregidos y b el error sistemático definido por la diferencia entre el valor calibrado (x_{cal}) y la media de 5 valores del valor obtenido mediante TC. La incertidumbre estándar debida a la corrección de los errores sistemáticos fue determinada por:

$$u_b = (t - 20^\circ\text{C}) \cdot u_{\alpha b} \cdot l \quad (3)$$

Donde t es la temperatura media de los patrones durante las repetidas mediciones TC, $u_{\alpha b}$ la incertidumbre estándar del coeficiente de expansión térmica del material de los patrones y l la distancia medida.

Todas las mediciones se llevaron a cabo en planos no influenciados por la falta de nitidez en las tomografías, ofreciendo suficiente fiabilidad en los resultados y evitando los "artifact" (aberraciones físicas no deseadas) ocurridos entre placas. En primer lugar se ajustó la superficie del patrón con el método avanzado del software comercial VGStudio MAX "local adaptive threshold method" [17]. Después, se estimó la falta de nitidez conocida como "geometric unsharpness", principalmente influenciada por la magnificación y tamaño de foco [15] (1,525 y 0,4 mm respectivamente), resultando en 0,205 mm. Finalmente, se localizaron los planos en los que se realizaron las mediciones a la mitad de la distancia del "unsharpness" desde la superficie de las placas generadas previamente por "local adaptive threshold method". Este procedimiento se replicó en todas las mediciones de tamaño y forma del estudio con el fin de sistematizar el proceso de medición TC.

Para la estimación de la incertidumbre expandida asociada al proceso de medición TC del tamaño y de la forma de los defectos, cada defecto fue medido en primer lugar mediante un sensor óptico calibrado y equipado en una Máquina de medición por coordenadas ZEISS O-INSPECT. Esta calibración proporcionó el resultado de calibración x_{cal} del tamaño y del error de forma de cada defecto con su correspondiente incertidumbre expandida de calibración U_{cal} . Por ello, la incertidumbre estándar debida a la calibración de los valores de referencia fue determinada por (para un factor de cobertura de $k = 2$):

$$u_{cal} = U_{cal}/2 \quad (4)$$

Debido a que la herramienta de microtaladrado (haz laser) tiene una naturaleza convergente, los microtaladros presentaron cierta conicidad, con lo que cada defecto se midió por ambos lados de la placa, denominando la cara A como la de incidencia del láser y la cara B como la de salida.

Finalmente, para la estimación de la incertidumbre expandida asociada al proceso de medición del volumen la pérdida de masa de cada placa tras el microtaladrado fue medida mediante una balanza electrónica de precisión PIONEER® calibrada y con una resolución de 0,001 mg. Esta calibración proporcionó el resultado de calibración x_{calm} de la diferencia de masa tras cada microtaladrado con su correspondiente incertidumbre expandida de calibración U_{calm} (permitiendo estimar posteriormente el volumen con el principio de Arquímedes).

Para evaluar la contribución de la calibración de la masa en volumen, se estimó la incertidumbre estándar debida a la calibración de los valores de referencia (u_{cal}) mediante la misma **ecuación 4**. Después, se utilizó la siguiente **ecuación 5** para para estimar la incertidumbre asociada a la masa (u_{vm}) y la incertidumbre asociada a la densidad ($u_{v\rho}$).

$$u_{vm} = \frac{x_{calm} + u_{cal}}{\rho_{prom}} - \frac{x_{calm} - u_{cal}}{\rho_{prom}} = \frac{2 \cdot u_{cal}}{\rho_{prom}}; \quad u_{v\rho} = \frac{x_{calm}}{\rho_{prom} - u_{\rho}} - \frac{x_{calm}}{\rho_{prom} + u_{\rho}} = \frac{2 \cdot x_{calm} \cdot u_{\rho}}{\rho_{prom}^2 - u_{\rho}^2} \quad (5)$$

Donde ρ_{prom} es la densidad promedio de la aleación de aluminio indicada por 5 diferentes suministradores del material y u_{ρ} la desviación estándar de las densidades consideradas. Finalmente, la incertidumbre estándar debida a la de la calibración de la masa en volumen (u_{calm}) fue determinada como:

$$u_{calm} = \sqrt{u_{vm}^2 + u_{v\rho}^2} \quad (6)$$

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La precisión de las mediciones de la porosidad mediante TC fue evaluada en 3 geometrías con diferente error de forma y sobre la influencia del espesor acumulado. Dichas medidas fueron previamente calibradas mediante diferentes laboratorios de calibración acreditados por la Entidad Nacional de Acreditación (ENAC). La **Tabla 2** presenta las incertidumbres de medición máximas atribuidas a las mediciones de calibración y los instrumentos empleados para asegurar la trazabilidad metrológica.

Mensurando	Equipo de calibración	Incertidumbre expandida de calibración U ($k=2$)
Tamaño	Sensor óptico calibrado (MMC)	0,02 mm
Error de forma	Sensor óptico calibrado (MMC)	0,02 mm
Masa (utilizada para el volumen)	Balanza electrónica	0,082 mg

Tabla 2 Incertidumbres de medición atribuidas a las mediciones de calibración y equipos empleados para ello

La **Tabla 3** resume los resultados de las incertidumbres expandidas de las mediciones TC (U_{MP}) del tamaño (T), error de forma (F) y volumen (V) de cada defecto contenido en cilindros de 70 mm, 50 mm y 30 mm de diámetro. La **Tabla 3** muestra como U_{MP} es mayor en las mediciones realizadas en los cilindros de mayor diámetro (mayor espesor acumulado).




		70mmØ			50mmØ			30mmØ			
		T	F	V(mm³)	T	F	V(mm³)	T	F	V(mm³)	
Geometría N1 	Valor calibrado	A	1,100	0,050	1,204	1,080	0,030	1,020	1,140	0,040	0,732
		B	0,630	0,030		0,660	0,050		0,650	0,040	
	Valor TC (\bar{X})	A	0,962	0,105	0,541	0,903	0,126	0,536	1,140	0,105	0,779
		B	0,537	0,089		0,655	0,057		0,701	0,076	
U_{MP}	A	0,036	0,032	0,082	0,047	0,063	0,077	0,037	0,034	0,060	
	B	0,088	0,074		0,056	0,032		0,037	0,035		
$U_{MP}(\%)$	A	4%	31%	15%	5%	50%	14%	3%	32%	8%	
	B	16%	83%		8%	56%		5%	46%		
Geometría N2 	Valor calibrado	A	1,090	0,100	0,964	1,090	0,110	0,834	1,070	0,110	0,708
		B	0,620	0,050		0,610	0,080		0,730	0,110	
	Valor TC (\bar{X})	A	0,836	0,139	0,488	0,855	0,171	0,535	1,057	0,171	0,718
		B	0,513	0,106		0,563	0,111		0,853	0,191	
U_{MP}	A	0,033	0,108	0,071	0,046	0,025	0,071	0,077	0,061	0,052	
	B	0,068	0,056		0,044	0,040		0,077	0,051		
$U_{MP}(\%)$	A	4%	78%	15%	5%	15%	13%	7%	36%	7%	
	B	13%	53%		8%	36%		9%	27%		
Geometría N3 	Valor calibrado	A	1,050	0,200	1,395	1,280	0,180	0,932	1,130	0,150	0,774
		B	0,690	0,190		0,650	0,110		0,640	0,120	
	Valor TC (\bar{X})	A	0,936	0,240	0,522	0,933	0,199	0,550	1,055	0,237	0,685
		B	0,607	0,197		0,624	0,169		0,729	0,186	
U_{MP}	A	0,042	0,059	0,094	0,060	0,022	0,074	0,042	0,072	0,066	
	B	0,054	0,022		0,068	0,131		0,033	0,035		
$U_{MP}(\%)$	A	4%	25%	18%	6%	11%	13%	4%	30%	10%	
	B	9%	11%		11%	77%		5%	19%		

Tabla 1 Incertidumbres expandidas estimadas para cada defecto y en ambos lados de las placas (A y B). Todos los valores no indicados están en mm.

Las mediciones del tamaño de los defectos muestran que las desviaciones entre los valores calibrados y los obtenidos mediante TC (b) pueden incluso ser despreciables en el menor espesor acumulado estudiado (30 mm). Este efecto se refleja también en los resultados del volumen, siendo ambos mensurandos, además, los que menor U_{MP} ofrecen. Sin embargo, los valores de U_{MP} del volumen son superiores a los de tamaño ya que la contribución de u_{calm} es mayor que u_{cal} por ser este mensurando medido indirectamente. En cambio, los defectos contenidos en mayores espesores acumulados ofrecen valores elevados de U_{MP} , principalmente por el bajo contraste que tienen en las TC y por la influencia del *Beam Hardening*. En el caso de los patrones de 70mmØ y 50mmØ los defectos medidos mediante TC son menores que los de calibración, sin embargo, para el patrón de 30mmØ incluso aumentan.

Por otro lado, pese a emplear un *voxel size* del mismo orden de magnitud que el error de forma de los defectos (incluso mayor), los resultados muestran que el procedimiento descrito en el artículo permite obtener valores en línea con los de referencia. Sin embargo, los resultados de forma tienen los mayores valores de U_{MP} en general, ya que incluso un valor atípico en el conjunto de datos influye significativamente en el resultado, y este puede ser debido principalmente al ruido generado por la radiación dispersa, conocida como "*scattering*". Además, dada la conicidad de los microtaladrados, fue posible evaluar la influencia de diferentes tamaños de defecto (lado A y B) en la U_{MP} . En la **Tabla 3** se observa cómo en todos los casos la $U_{MP}(\%)$ aumenta en los tamaños más pequeños, siendo más notable en el mayor espesor acumulado.

4. CONCLUSIONES

De la investigación realizada se pueden establecer las siguientes conclusiones:

- En este estudio se ha utilizado en un sistema de escaneo rápido de clase “macroCT”, el tipo de máquina de rayos-X más empleado en la inspección en cadena en procesos productivos. Estos equipos permiten escaneos TC en pocos minutos y los resultados obtenidos con el procedimiento descrito indican una alta precisión (principalmente en espesores de 30 mm) de las mediciones de defectos internos en componentes fabricados mediante *Powder Bed Fusion* (PBF) mediante TC.
- Los datos TC se corrigieron en función de los factores de escala utilizando esferas situadas en los mismos patrones. Se comprobó que este método es eficiente para una gran variedad de distancias entre centros de esferas a diferentes direcciones espaciales. Sin embargo, el bias fue elevado en los resultados de medición de los defectos. Esto es debido principalmente a efectos inherentes al proceso TC como el *Beam Hardening* y el *scattering* y no se puede compensar adecuadamente reescalando el tamaño del *voxel size*, sino modificando los parámetros de los algoritmos de análisis de porosidad. Por ello, este estudio determina que no es adecuado utilizar el mismo algoritmo (con mismos parámetros) para la estimación de la defectología interna de una pieza de aluminio con diferentes espesores acumulados (el escenario real de la mayoría de las piezas de automoción, aeronáutica, etc.).
- Aunque los valores de incertidumbre proporcionados en el estudio son relativamente altos dada la resolución de escaneo utilizada, el método de medición por TC ha demostrado ser repetible. Aunque no se ha demostrado, la aplicación de este método a imágenes de TC de mayor resolución sería relativamente sencilla, lo que mejoraría en gran medida los valores de U_{MP} .
- El trabajo futuro deberá centrarse en transferir esta incertidumbre a la medición de los defectos internos de piezas no calibradas de aluminio fabricadas por FA, lo cual proporcionará el vínculo necesario para lograr la trazabilidad metrológica. La idea general de este estudio es poder clasificar los defectos de FA en función de su tamaño, forma y volumen y determinar su procedencia de una forma fiable (ej. atrapamiento de aire o falta de fusión).

5. REFERENCIAS

- [1] Villarraga-Gómez, H., Herazo, E. L., & Smith, S. T. (2019). X-ray computed tomography: from medical imaging to dimensional metrology. *Precision Engineering*, 60, 544-569.
- [2] Yagüe-Fabra, J. A., Jiménez, R., Ontiveros, S., Torralba, M., & Tosello, G. (2018). Surface extraction algorithm influence on the uncertainty assessment and tolerance compliance of computed tomography measurements. *Procedia CIRP*, 75, 119-124.
- [3] Thompson A, Maskery I, Leach RK. X-ray computed tomography for additive manufacturing: A review. *Meas Sci Technol* 2016;27. <https://doi.org/10.1088/0957-0233/27/7/072001>.
- [4] Villarraga-Gómez H, Peitsch CM, Ramsey A, Smith ST. The role of computed tomography in additive manufacturing. *Proc - 2018 ASPE Euspen Summer Top Meet Adv Precis Addit Manuf* 2018:201–10.
- [5] Lambert J, Chambers AR, Sinclair I, Spearing SM. 3D damage characterisation and the role of voids in the fatigue of wind turbine blade materials. *Compos Sci Technol* 2012;72:337–43. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2011.11.023>.

- [6] Withers PJ, Bouman C, Carmignato S, Cnudde V, Grimaldi D, Hagen CK, et al. X-ray computed tomography. *Nat Rev Methods Prim* 2021. <https://doi.org/10.1038/s43586-021-00015-4>.
- [7] Holgado, I., Iglesias, J., Ortega, N., Plaza, S., & Pascual, A. (2021, October). CT image quality influence on different material Edge Response Functions for accurate metrological applications. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 1193, No. 1, p. 012064). IOP Publishing.
- [8] Catalucci S, Thompson A, Piano S, Branson DT, Richard III. Optical metrology for digital manufacturing : a review. *Int J Adv Manuf Technol* 2022. <https://doi.org/10.1007/s00170-022-09084-5>.
- [9] Hermanek P, Carmignato S. Porosity measurements by X-ray computed tomography: Accuracy evaluation using a calibrated object. *Precis Eng* 2017;49:377–87. <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2017.03.007>.
- [10] Kim, F. H., Pintar, A. L., Moylan, S. P., & Garboczi, E. J. (2019). The influence of X-Ray computed tomography acquisition parameters on image quality and probability of detection of additive manufacturing defects. *Journal of manufacturing science and engineering*, 141(11), 111002.
- [11] Lesseur, J., Tranchand, B., Mancier, T., Montauzier, A., Larignon, C., & Perusin, S. (2022). On the use of X-ray microtomography to control artificial defect geometries produced by metal additive manufacturing. *Nondestructive Testing and Evaluation*, 1-20.
- [12] Jansson, A., Zekavat, A. R., & Pejryd, L. (2015). Measurement of internal features in additive manufactured components by the use of computed tomography. In *Digital Industrial Radiology and Computed Tomography (DIR 2015)*, Ghent, Belgium, June 22-25, 2015. German Society for Non-Destructive Testing.
- [13] Obaton, A. F., Klingaa, C. G., Rivet, C., Mohaghegh, K., Baier, S., Andreasen, L. J., ... & Chiffre, L. (2020). Reference standards for XCT measurements of additively manufactured parts. In *10th Conference on Industrial Computed Tomography* (pp. 1-10).
- [14] <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/cyanoacrylate-adhesive> (Visitado el 26/04/2022)
- [15] De Chiffre, L., Carmignato, S., Kruth, J. P., Schmitt, R., & Weckenmann, A. (2014). Industrial applications of computed tomography. *CIRP annals*, 63(2), 655-677.
- [16] Sladek, J. A. (2016). Coordinate metrology. *Accuracy of Systems and Measurements*.
- [17] <https://www.volumegraphics.com/en/products/vgsm/dimensional-metrology.html> (Visitado el 29/04/2022)

6. AGRADECIMIENTOS

Al Ministerio de Ciencia e Innovación por su apoyo al proyecto de investigación "Investigación de una solución para el acabado y control de calidad de componentes aeroespaciales de aluminio fabricados por SLM" (PID2020-118478RB-100). Asimismo, agradecer también el apoyo del Gobierno Vasco en la convocatoria IT 1573-22. Finalmente, agradecer al Departamento de Desarrollo Económico, Sostenibilidad y Medio Ambiente del Gobierno Vasco la financiación del proyecto kk-2022/00030 a través de la convocatoria de Proyectos de Investigación Fundamental Colaborativa.