



PROYECTOS DE INVESTIGACIÓN 2018

MEMORIA DEL PROYECTO Nº 06

1. DATOS DEL PROYECTO

Título: Evaluación metrológica del proceso de Sinterizado Láser de Metal

Investigador/a/es responsable/es: Eduardo Cuesta González **Tfno:** 986182136

E-mail: ecuesta@uniovi.es

Otros investigadores: Braulio Alvarez Alvarez (Univ. Oviedo), Agustín Castaño Rivero (Univ. Oviedo), Pablo Zapico García (Univ. Oviedo), Joaquín Barreiro García, (Univ. León), Susana Martínez Pellitero, (Univ. León)

Empresas o instituciones colaboradoras:

- Fundación PRODINTEC (GIJON)
- INTELMEC Ingeniería (Parque Tecnológico de Asturias, Llanera, Edif. CEEI)

2. MEMORIA DESCRIPTIVA DEL PROYECTO

2.1 Resumen ejecutivo

El presente proyecto pretende la evaluación metrológica del proceso de Sinterizado Laser de Metal, en su variante denominada como Sinterización directa por Láser de Metal (Direct Metal Laser Sintering, DMLS). Esta tecnología es una de las variantes de los procesos de Fabricación Aditiva más prometedores actualmente cuando se trata de incorporar funcionalidad a las piezas fabricadas. Se trata de una tecnología de fabricación de metales aditiva basada en la fusión láser selectiva (SLM). Con ella se pueden fabricar prototipos y herramientas metálicas directamente a partir de datos CAD. Los metales que puede incorporar actualmente son aleaciones que se sintetizan a partir de polvo multi-componente con base Cr, Al, V, Ti, etc. pudiendo generar piezas totalmente funcionales en cuanto a características geométricas y mecánicas.

En el caso del DMLS, y debido precisamente a la posibilidad de crear piezas funcionales, la precisión dimensional con que se fabriquen las piezas es un factor crítico. Desgraciadamente, la impresión 3D con DMLS, aun suponiendo una ventaja enorme para los diseñadores, se está convirtiendo en un dolor de cabeza para los metrólogos; que se encuentran con claras deficiencias en dar trazabilidad dimensional a las piezas que son fabricadas por esta tecnología o en certificar las propias Máquinas-Herramienta (Impresoras 3D) que las fabrican. Así, el proyecto pretende precisamente desarrollar una metodología de evaluación metrológica del proceso, evaluando la calidad dimensional y geométrica de las piezas fabricadas con esta tecnología, e indirectamente de las impresoras 3D que las fabrican.

Para ello este proyecto utilizará una metodología basada en (1) concebir una serie de geometrías básicas de referencia, (2) sinterizarlas por láser y (3) inspeccionarlas posteriormente con diferentes tecnologías. con contacto (máxima precisión) y sin contacto. La metodología basada en estas fases conseguirá ventajas a nivel no solo de optimización de parámetros de proceso con reconocimiento de los límites dimensionales del proceso; sino también de validación de la geometría/s que mejor se adapte a las piezas fabricadas con esta



tecnología. No se descarta incluso hacer propuestas de patrones dimensionales (asociados a una tecnología de inspección) para verificación y recertificación de máquinas de Sinterizado Laser de Metal.

2.2 Objetivos iniciales del proyecto y grado de consecución

En el proyecto se habían establecido tres grandes grupos de resultados en los que se subdividía la propuesta, cada uno de ellos suponía un resultado ya interesante por sí mismo:

- Definición de patrones dimensionales para evaluar la precisión en Sinterizado Láser de Metal. Además de definir geometrías patrón, la sinterización de las mismas podrá a su vez subdividirse en variar ciertos parámetros dentro de una misma máquina (sobre todo orientación dentro del vol. de la máquina, etc.), al margen de usar ciertos materiales. También interesa la posibilidad de variar la máquina si fuera posible (trabajando con distintos fabricantes de DSLM). En todo caso la comparativa de las distintas piezas patrón consideradas permitirá:
- Identificación de los límites dimensionales, geométricos (GD&T), y de acabado superficial, con los que se fabrican estas piezas. Estos límites pueden ayudar a proponer estrategias y/o parámetros optimizados de las mismas. Este proceso se llevará a cabo con inspección completa de las geometrías, basada en contacto (Máquina de Medir por Coordenadas)
- Detección de la tecnología de medición más adecuada para inspeccionar piezas de metal sinterizadas por láser. Hay que tener en cuenta que las piezas DMLS tienen un acabado muy característico con alta rugosidad, originado precisamente por su fabricación basada en capas. Este acabado puede condicionar enormemente su inspección por métodos sin contacto, métodos muy interesantes hoy en día por la rapidez, densidad de puntos y portabilidad que permiten. Por ello este proyecto se medirán las citadas piezas patrón primero, por contacto, y posteriormente, con diversas tecnologías disponibles por el equipo investigador. La comparativa permitirá validar a su vez la mejor tecnología de inspección sin contacto, usando la medición por contacto como referencia (Maquina de Medir por Coordenadas).

El objetivo fundamental del proyecto es caracterizar metrológicamente el proceso de Sinterizado laser de Metal (DMLS). Se pueden citar otros objetivos desglosados que se derivan directamente de este tipo de investigación (entre paréntesis grado de consecución):

(100%) - Estudio de los parámetros del proceso.

Influencia de los mismos en cuanto a precisiones dimensionales, propuestas conceptuales de geometrías básicas de referencia y exploración.

(100%) - Definición de nuevos patrones dimensionales orientados a evaluación metrológica del sinterizado laser basada en evaluación dimensional y geométrica (GD&T),

Una vez definidas en detalle las dimensiones y geometrías a incorporar, y escogido el material (en función de la maquina disponible) se generan los CAD de referencia finales.

(100%) - Fabricación de los patrones prototipo.

Se fabrican los prototipos teniendo en cuenta restricciones de material y sobre todo de coste.

(100%) - Establecimiento de límites, dimensionales y geométricos alcanzables con esta tecnología.

Se definen las distintas tolerancias (GD&T) a evaluar. En esta fase, y una vez fabricadas físicamente los patrones, se genera el programa de inspección GD&T, en principio con la tecnología más precisa, por contacto (en máquina tridimensional de medir por coordenadas).

(100%) - Análisis de resultados.

El análisis de los resultados de las medidas de la MMC permitirá obtener por comparativa las desviaciones entre el proceso de DMLS (patrón sinterizado) y los nominal del CAD.

(0%) - Comparativa métodos de inspección.

Opcionalmente, y en función de los plazos de ejecución del proyecto, se pretendía también la definición de la mejor tecnología de inspección óptica para su aplicación al control de piezas fabricadas por Sinterizado laser. Existen en el mercado numerosos sistemas y tecnologías sin contacto, pero no hay una guía que permita identificar cuáles son las más adecuados considerando aspectos como tiempo de inspección-coste de inspección-características a evaluar-rango de precisión requerido. Hay tecnologías que pueden ser complementarias cuando se trata de evaluar aspectos dimensionales junto con calidad superficial, defectos o texturas.

A modo de resumen de las tareas realizadas, puede observarse en la fig.1 la metodología desarrollada para la investigación.

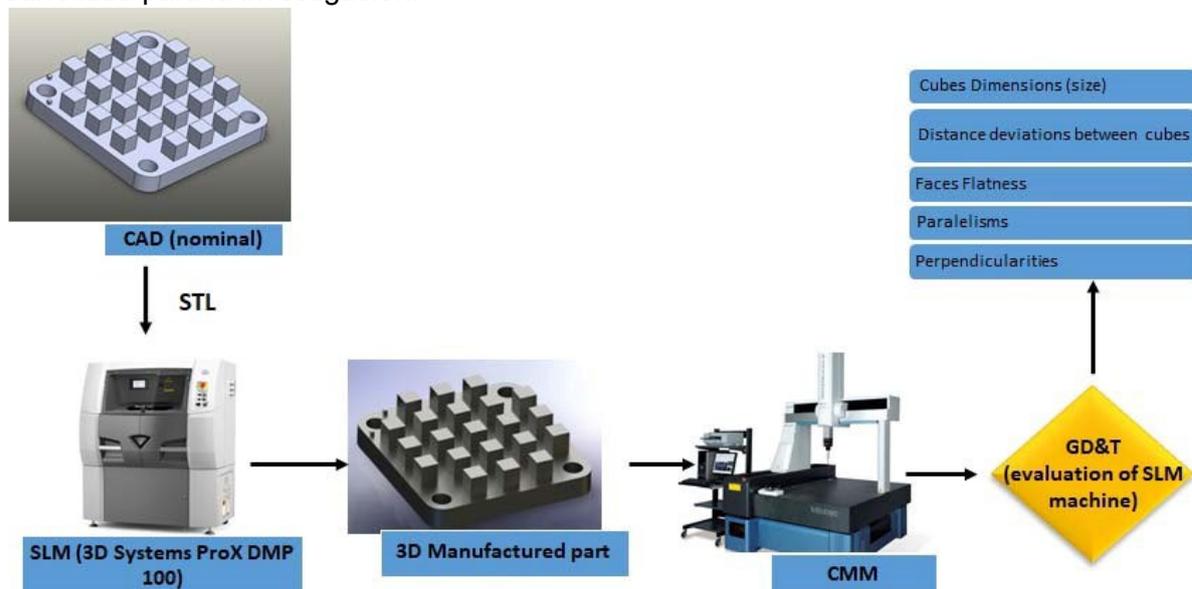


Fig. 1. Metodología de la experimentación

2.3 Tareas realizadas

Como se deduce de la metodología y de los objetivos comentados, el proyecto constó de las siguientes actividades ejecutadas cronológicamente:

- 1- Estudios Previos: Tecnología Sinterizado Laser de metal (DMLS)
- 2- Estudios Previos: Técnicas de inspección (con y sin contacto)
- 3- Definición de patrones dimensionales para sinterizado
- 4- Fabricación de patrones prototipo
- 5- Inspección de Prototipos (ensayos)
- 6- Análisis y Comparativa
- 7- Publicación resultados. Informe técnico y publicación en congreso/revista de impacto

Como se detalló en el aptdo. 2.2, las actividades 1 a 7 fueron llevadas a cabo con el grado de cumplimiento muy alto. A continuación, se muestran imágenes que dan idea de la experimentación.

En referencia a los estudios previos (fases 1 y 2), y a margen de enseñar al becario las técnicas de inspección y en concreto la inspección con máquina de medir por coordenadas, se recopilaron artículos y documentación de investigaciones similares referidas a la concepción de patrones dimensionales para tecnologías de AM (fabricación aditiva). Muchos de los artículos ensayan diversas piezas test con otras tecnologías de impresión 3D con polímeros (polijet, FDM, estereolitografía, etc.) y manejando diversas variables y magnitudes de influencia (material, posición, tamaño de capa, potencia del láser, estrategias de impresión, etc.). En todo caso, la búsqueda de documentación se centró en evaluación GD&T de piezas de AM y en concreto en sinterizado (SLS y SLM) de metal. La problemática derivada del acabado tan específico de este tipo de tecnología, con rugosidades muy elevadas (cuando se considera la pieza “as built”, según sale de la impresora) determina en gran medida las líneas de investigación, muy centradas en evaluación de la topología superficial de las muestras más que en el aspecto macrogeométrico (GD&T).

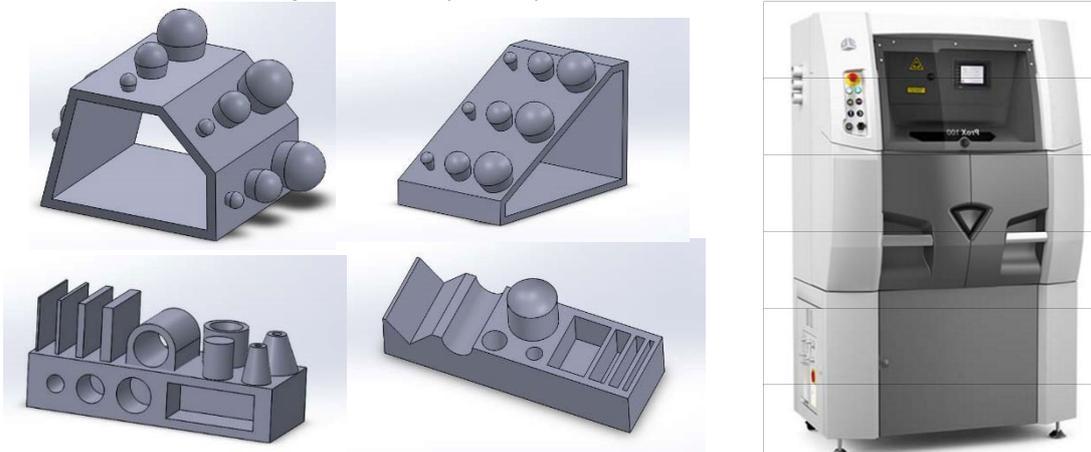


Fig. 2. Izq. Diversos descartes de piezas patrón para evaluación geométrica del Sinterizado por fusión directa de metal (DMLS). Der. Impresora para DMLS modelo 3D Systems ProX Direct Metal Printing

En todo caso y dentro de la fase 3, en la figura 2 se muestran diversos descartes y modelos previos de piezas patrón. Finalmente, y tras consensuar el/los mejor/es modelo/s para evaluación dimensional del proceso de DMLS se seleccionaron dos geometrías (fig. 3): Una basada en matriz de cubos y otra basada en matriz de esferas.

La primera de ellas (fig. 3 arriba) es una geometría muy orientada a la evaluación de la precisión dimensional de posicionamiento del rodillo (roller o feeder) encargado del suministro y reparto de la capa de polvo metálico. Para ello se disponen 21 cubos repartidos uniformemente cubriendo toda la placa base. La disposición de los cubos es tal que evalúa como imprime (realiza los micro-cordones de soldadura) la maquina según avanza el rodillo, entre puntos del rodillo, y para toda la placa base donde se sustentan las sucesivas capas. Las dimensiones de los mismos, pues son cubos de 10x10x10 mm, permite evaluar también las dimensiones (altura, ancho y largo) con las que son fabricados, la planitud de las caras, la distancia entre cubos y el paralelismo entre caras. Puede decirse que de alguna forma esta pieza evalúa en gran medida precisión de posicionamiento de la geometría impresa,

centrándose sobre todo en evaluar el desenvolvimiento de la máquina según las direcciones dentro del rodillo de impresión y perpendiculares al mismo, según dirección de avance del dosificador.

La segunda de las piezas test (fig. 3 abajo), utiliza una matriz de esferas para la evaluación dimensional. Para ello se disponen 9 esferas repartidas en el volumen central de medición de la impresora. Se establecen 3 diámetros distintos (diámetros de 5, 10 y 15 mm), donde cada una está dotada de una geometría específica tal que abarcan 105° desde el polo al ecuador, permitiendo medir incluso más abajo del ecuador sin necesidad de material soporte. Esta geometría está más orientada a evaluar el desenvolvimiento de la impresión “en altura”, buscando ver como se imprimen esferas en cuanto a diámetro, error de forma, posición (XY z del centro) y distancias entre ellas. La forma y distribución de las esferas emula el procedimiento de evaluación metrológica que tienen los ensayos de verificación periódica y/o de certificación de las propias máquinas de medir por coordenadas. Esto es porque la esfera es una de las entidades mejor definidas matemática y metrológicamente hablando, y en este caso además, la variedad de las mismas (5, 10 y 15 mm), su disposición espacial (distribuidas según ejes inclinados en ángulos de 0° , 15° y 30° originando múltiples alturas) y la posibilidad de medir más abajo de una semiesfera, permite una evaluación conceptual rápida y fiable de la precisión dimensional con la que imprime la máquina.

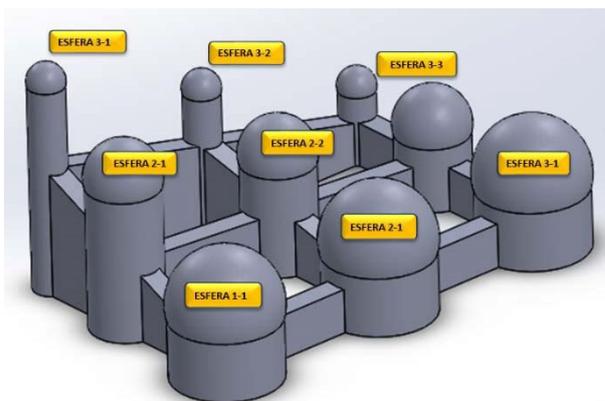
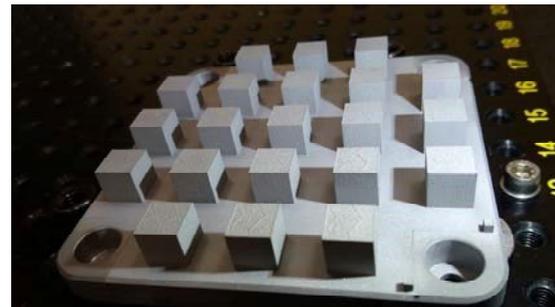
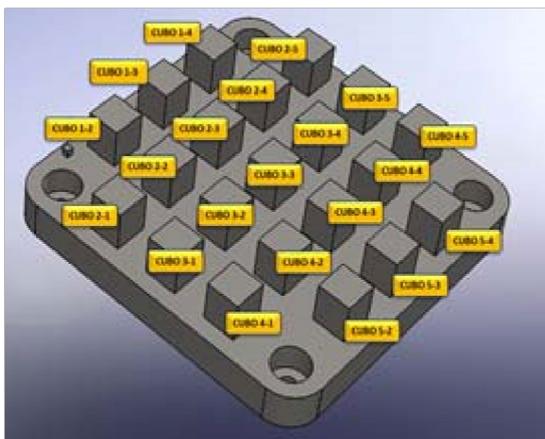


Fig. 3. Izq. modelos CAD finales diseñados para la investigación y nomenclatura de cubos y esferas. Der. modelos reales sinterizados por fusión láser de metal. (acabado en bruto, o “as built”).

Gracias a la incorporación a este trabajo de investigadores de la Univ. de León (grupo oficial TAFI, <http://tafi.unileon.es/people.php>, del que el IP forma parte) y que pusieron a disposición de la investigación una impresora DMLS (3D Systems ProX, fig. 1) se pudieron finalmente fabricar los modelos propuestos dentro de la fase 4 del proyecto (fig.2.der). El material escogido para ambas piezas patrón fue el acero inoxidable 17-4 PH, que es acero aleado con Cr, Co, Mn, Ni, Nb y Si; y endurecido por precipitación (PH), con un límite elástico de 620 MPa en condición “as-built” (se pasa de límite elástico de 620 MPa a 1100 MPa después de realizarle un tratamiento térmico a la pieza).

Posteriormente, y dentro de la fase 5, se procedió a la evaluación metrológica propiamente dicha de las piezas fabricadas. Para ello fue necesario previamente establecer una codificación de forma que permitiese la evaluación ordenada y coherente de las distintas entidades a evaluar, tanto para la pieza de cubos, como para la pieza de esferas.

En la pieza de los cubos (patrón de cubos) se mantuvo siempre la referencia de los mismos sobre la placa base donde se sustentan. Pues la evaluación buscaba en gran medida analizar también los errores de posicionamiento de la maquina sobre dicha placa. En cambio, en el patrón de esferas, éstas son independientes de la placa base, pues es una evaluación más volumétrica. La fig. 4 muestra algunos detalles de las mediciones de las entidades sobre la MMC disponible (modelo *DEA Global Image* de *Hexagon Metrology*) con el software PC-DMIS. El tipo de evaluación efectuada, es decir, los parámetros medidos se muestran en la tabla 1.

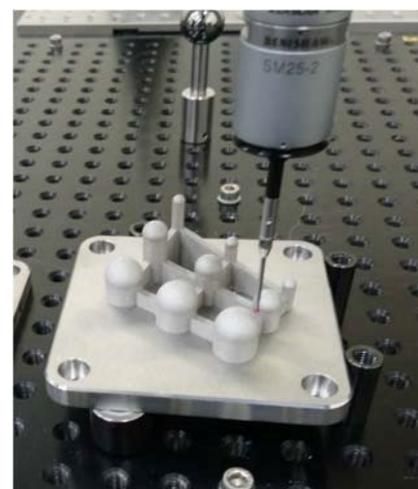
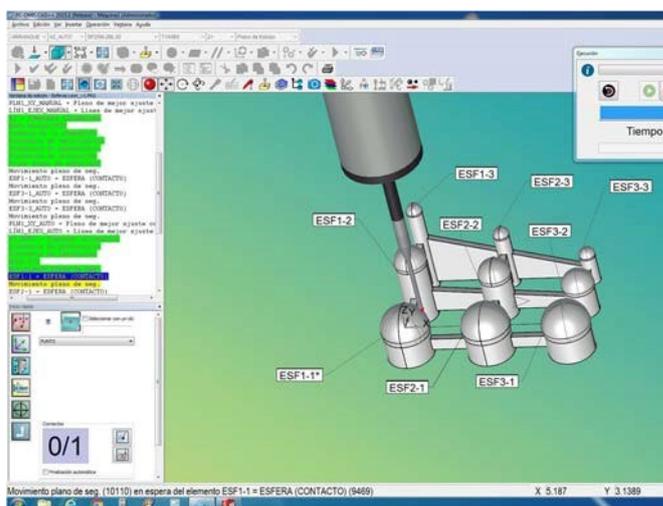
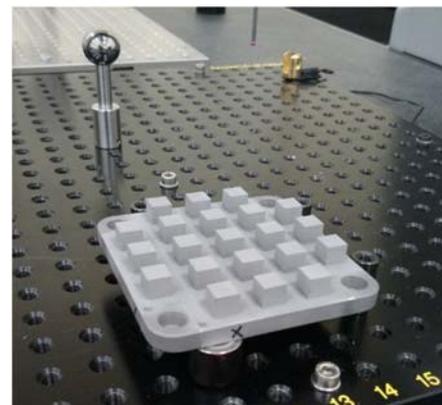
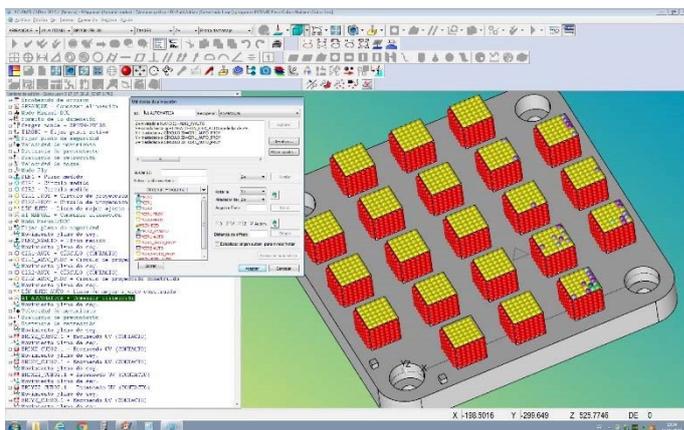


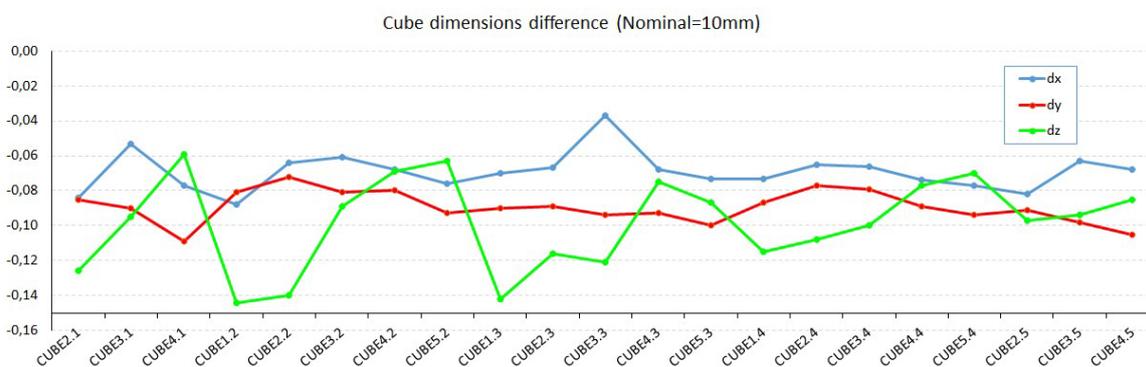
Fig. 4. Evaluación metrológica de los patrones de cubos y esferas con Maquina de Medir por Coordenadas

Tabla 1. Parámetros medidos sobre cada una de las piezas patrón para DMLS

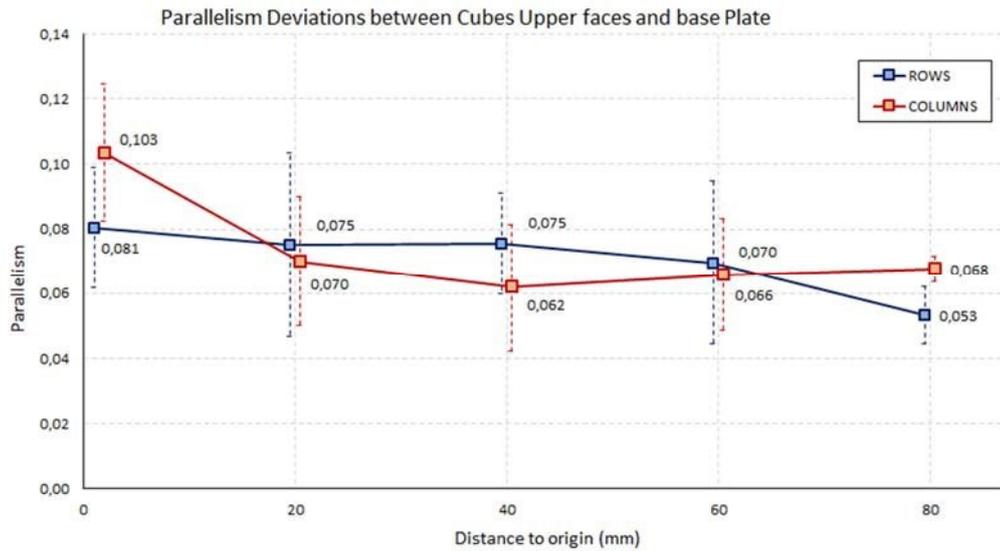
	Patrón de Cubos		Patrón de Esferas		
	parámetros	descripción		parámetros	descripción
Dimensiones	Dx, Dy, Dz	21 cubos, Nominales de 10x10x10 mm	Diámetros	∅5, ∅10, y ∅15 mm.	9 esferas. 3 de ∅5 mm, 3 de ∅10 mm y 3 de ∅15 mm.
Distancias entre planos	20, 40, 60 y 80 mm	En filas y en columnas	Distancias entre esferas	Rangos aprox. de 18, 25, 32 y 52 mm	Según rango de distancia y según ángulo de inclinación (0°, 15°, 30°)
Paralelismos	Pxy, Pxz, Pyz	Entre caras del cubo. (3 / cubo).	Posición	Xc, Yc, Zc	Centros de esferas
Error de forma (Planitudes)	Plx, Ply, Plz	Valores individuales y medios	Error de forma (Esfericidad)	Er5, Er10, Er15	Valores individuales y medios

2.4 Resultados obtenidos

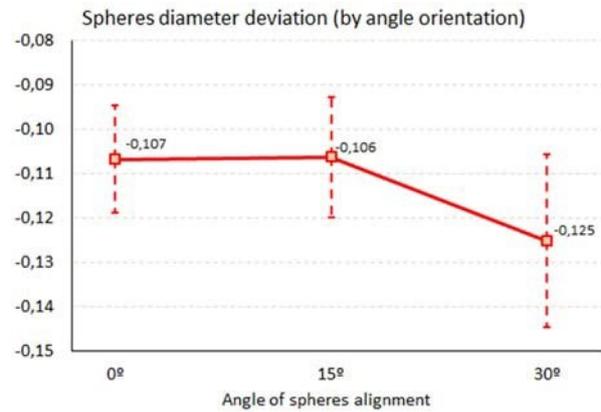
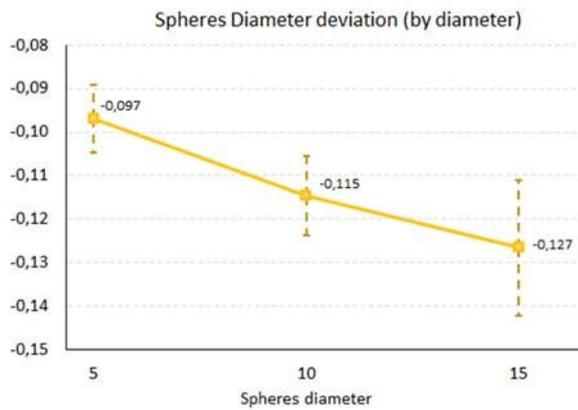
Una vez medidas todos los parámetros de las piezas patrón en la MMC, éstos fueron exportados a hojas de MS Excel, donde se graficaron, por un lado, los valores medidos y por otro las diferencias entre todos los valores medidos y los nominales del CAD. A modo de (pequeña) muestra de este tipo de gráficas, se adjunta la figura 5, con algunos de los parámetros más intuitivos de la comparativa. Desviaciones de las dimensiones de los cubos (fig. 5a), desviaciones de Paralelismo de caras de cubos (fig. 5b), desviaciones en los diámetros de las esferas (fig. 5c), y desviaciones en error de forma de las esferas y cubos (fig. 5d).



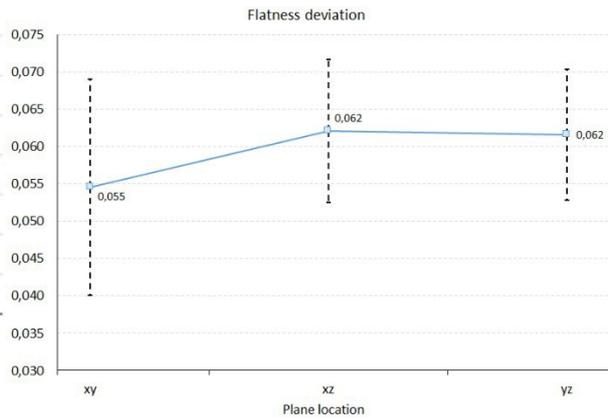
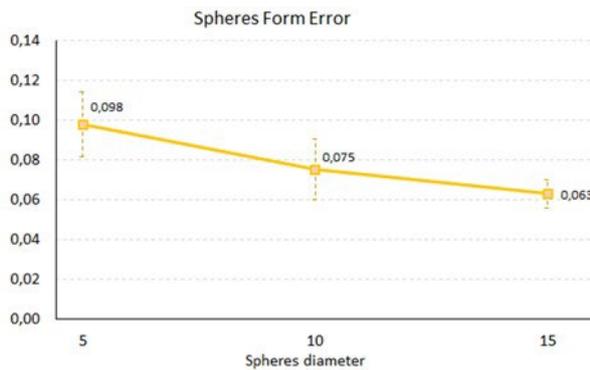
a) Desviaciones en dimensiones de cubos (según X, Y y según Z, en altura)



b) Desviaciones de paralelismo en planos horizontales



c) Desviaciones en diámetros de esferas



d) Desviaciones en errores de forma

Fig. 5. Ejemplos de Gráficas de las desviaciones CMM vs. Sinterizado laser obtenidas en la investigación.

El análisis detallado de estas graficas permite finalmente ofrecer valores fiables de la precisión que es capaz de ofrecer esta tecnología.



2.5 Trabajos o necesidades futuras

Dado el acabado tan basto que se obtiene en las piezas en bruto (“as built”), según salen de la impresora, es muy habitual someter las piezas a un granallado con arena de sílice de grano fino, Este proceso de arenado puede modificar sustancialmente las dimensiones de la pieza. Se hace necesario pues arenar las piezas, y volverlas a medir, evaluando como han cambiado los distintos parámetros metrológicos de la tabla 1. Es más, incluso la pieza arenada suele ser habitual someterla a un tratamiento térmico de relajación a alta temperatura (650°C), con el fin de relajar tensiones aumentando su densidad e incrementado ciertos valores de resistencia mecánica (en teoría se pasa de límite elástico de 620 MPa a 1100 MPa después de realizarle este tratamiento térmico a la pieza). También será interesante hacer una nueva evaluación metrológica de la pieza arenada y de la pieza envejecida posteriormente. Es más, este proceso de aplicar tratamiento térmico posterior puede realizarse con distintos procesos sucesivos que incluyan no solo la relajación de tensiones, sino también un posterior tratamiento térmico para pasivado o envejecimiento (con re-sinterización a 1100°C).

Al margen de estos postprocesados superficiales (arenado) y los posteriores tratamientos térmicos (y cuya influencia dimensional está siendo estudiada en el tramo final de la investigación, en enero del 2019), se plantea como trabajo futuro la comparativa entre distintos sistemas de inspección sin contacto de los 2 patrones impresos por sinterizado láser. Tomando como referencia las medidas más precisas, las realizadas por contacto (en MMC), se medirán nuevamente los patrones con al menos otras dos tecnologías de medida sin contacto: fotogrametría con luz estructurada y sensor de triangulación laser. La primera de ellas está siendo realizada dentro de una tesis Doctoral de la Universidad de León y la segunda muy probablemente se solicitará como proyecto IUTA de la convocatoria del 2019.

Por último, comentar que, por falta de presupuesto, también queda pendiente la extensión de este estudio a diferentes fabricantes. Esta variable, la propia impresora de metal 3D, es más importante incluso que el cambio de material (imprimiendo en otra aleación) siempre que la Máquina sea de dimensiones equivalentes.

2.6 Divulgación de los resultados (publicaciones, artículos, ponencias...)

Una parte importante de la experimentación se publicará en el congreso Internacional MESIC *Manufacturing Engineering Society International Conference* (MESIC-2019). El abstract ha sido aprobado y el full paper se envía el próximo mes de enero del 2109. Los datos de la publicación son:

- Dimensional accuracy analysis of Direct Metal Printing machine focusing on roller positioning errors. 8th Manufacturing Engineering Society International Conference (MESIC 2019), Eduardo Cuesta, Adrian Gesto, Braulio J., Alvarez, Susana Martinez, Pablo Zapico, Sara Giganto, Madrid. 19 al 21 de junio 2019.

3. MEMORIA ECONÓMICA



Financiación		Personal	Inventariable	Fungible	Otros gastos
IUTA	SV-18-GIJÓN-1.	4050			
Otras fuentes	Proyecto DPI2017-89840-R			1500 (fabricación de 3 piezas sinterizadas)	
Estudiante con ayuda a la investigación	Nombre	Adrián Gesto Vázquez			
	Tareas	Becario			
	Período	6 meses: 01-06 al 31-12 del 2018			

4. OTROS PROYECTOS Y CONTRATOS CON FINANCIACIÓN EXTERNA

Título del proyecto/contrato	SISTEMATIZACIÓN DE LA FABRICACIÓN PERSONALIZADA DE MOLDES MEDIANTE FABRICACIÓN ADITIVA 3DP Y DE SU INSPECCIÓN CON METROLOGÍA ÓPTICA
Referencia	REF. DPI2017-89840-R
Investigador/a/es principal/es	Joaquín Barreiro García y Ana Isabel Fernández Abia (Universidad de León)
Equipo investigador	Joaquín Barreiro García, Ana Isabel Fernández Abia, Susana Martínez-Pellitero (Universidad de León) Eduardo Cuesta Glez, Braulio J, Álvarez Álvarez, Pablo Zapico García (Universidad de Oviedo)
Periodo de vigencia	desde: 01-01-2018 hasta: 31-12-2020
Entidad financiadora	M.E.C.- MINISTERIO DE ECONOMÍA Y COMPETITIVIDAD, (DPI-DISEÑO Y PRODUCCIÓN INDUSTRIAL), PROGRAMA ESTATAL DE I+D+I ORIENTADA A LOS RETOS DE LA SOCIEDAD (PLAN ESTATAL DE I+D+I 2013-2016)
Cantidad subvencionada	144.716,00 €