

PROYECTOS DE INVESTIGACIÓN 2020

MEMORIA DEL PROYECTO Nº 03

1. Datos del proyecto

Título: Desarrollo de un patrón cerámico para calibración de equipos de metrología sin contacto e ingeniería inversa

Investigador/a/es responsable/es: Braulio José Álvarez Álvarez

Teléfono: 985182443

E-mail: braulio@uniovi.es

Otros investigadores:

Eduardo Cuesta González, 10834371Z, Universidad de Oviedo

Víctor Manuel Meana Díaz, 10842394X, Universidad de Oviedo

Alejandro García Corujo, 53678037Q, Universidad de Oviedo

Sara Giganto Fernández, 71561607M, Universidad de León

Pablo Zapico Garcia, 53541896N, Universidad de Oviedo

Susana Martinez Pellitero, 09779844Z, Universidad de León

Empresas o instituciones colaboradoras:

- ISM3D (Ingeniería y Servicios de Medición Tridimensional, S.L.) que se dedica a la medición y calibración tridimensional de patrones, utillajes y piezas master de precisión.
- DINAMET Ingeniería S.L., ingeniería que trabaja en el sector de asistencia técnica en proyectos de reparación, mantenimiento y optimización de equipos y maquinaria industrial, donde utilizan técnicas de ingeniería inversa de piezas metálicas complejas.
- DOGRAM Ingeniería de documentación tridimensional S.L., ingeniería especializada en la gestión y realización de proyectos de metrología y control dimensional mediante digitalización 3D.

2. Memoria descriptiva del proyecto

2.1 Resumen ejecutivo

El proyecto pretende el desarrollo y validación de un patrón dimensional para la verificación y calibración de equipos de metrología dimensional sin contacto e ingeniería inversa. En última instancia el proyecto pretende dar trazabilidad a las medidas que se obtienen con estas tecnologías, basándose en una evaluación a partir de tolerancias dimensionales y geométricas (evaluación GD&T) sobre densas nubes de puntos.

La idea es hacer un patrón óptico “único”, para la verificación y calibración de distintos equipos de ingeniería inversa. Al ser un único artefacto, éste permitirá también la comparativa entre las tecnologías en términos de ajuste, calidad y tiempo de captura de las nubes de puntos.

La justificación del proyecto tiene que ver directamente con los objetivos que se plantean:

- La falta de trazabilidad de los equipos de ingeniería inversa.
- La falta de parámetros “unificados” de verificación, que permitan comparación metrológica entre equipos, en términos de calidad de la nube de puntos, trazabilidad y/o tiempo de captura, por ejemplo.
- La necesidad de desarrollo de patrones con buenas propiedades ópticas (acabado superficial bajo, pero que genere luz difusa, sin reflexiones), a la vez que mantengan las propiedades dimensionales y térmicas (baja dilatación), de dureza (resistencia al rayado), resistencia a la corrosión y estabilidad (posibilidad de limpieza, etc.) y con diferentes geometrías.

Este proyecto podría beneficiar a diferentes usuarios de equipos de ingeniería inversa. En casos como el de laboratorios de calibración (ISM3D), este patrón les abre nuevas posibilidades de ofertar calibración para este tipo de prototipos. En el ámbito de la ingeniería inversa (Dogram), supone una vía para extender las capacidades de la misma incorporando objetivos de medición sin contacto, para lo cual se requiere la trazabilidad de las medidas realizadas, para lo cual la existencia de un patrón como el propuesto es indispensable. Y finalmente para clientes finales de empresas como las anteriores (DINAMET) que necesitan conocer el grado de aproximación a la geometría real que la medición sin contacto proporciona para poder tomar decisiones en cuanto a la reconstrucción de piezas, componentes de maquinaria que sea necesario sustituir.

En el proyecto se ha llevado a cabo el diseño, fabricación y calibración a su vez, de un nuevo artefacto patrón dotado de características ópticas. Basándonos en este patrón se ha desarrollado también un procedimiento de calibración adaptado para todas las tecnologías sin contacto disponibles.

Para la calibración se utilizó la medición por contacto en Máquina de Medir por Coordenadas, lo que permitió generar un modelo CAD de referencia denominado modelo “CAD cuasi-real”.

En cuanto a las tecnologías de digitalizado sin contacto, se dispuso de tres equipos distintos: un sensor láser por triangulación montado en la Máquina de Medir por Coordenadas, un sensor láser por triangulación montado en un Brazo de Medir, y un sensor láser por triangulación de manejo totalmente manual.

El patrón desarrollado fue digitalizado con cada uno de estos equipos, que presentan diferencias en cuanto a exactitud debido a la implementación de diferentes filtros durante el digitalizado. Para obtener nubes de puntos del patrón que fuesen consistentes y comparables entre sí, fue necesario un estudio de los parámetros de filtrado realizados con posterioridad a la digitalización. En este aspecto, uno de los resultados destacables de la investigación fue la determinación de un factor multiplicador óptimo para el filtro denominado filtro Sigma, lo cual permitió la comparación de resultados entre todos los equipos.

Como resultados últimos del trabajo de investigación se obtuvieron tablas y gráficos de resultados de medición según la entidad evaluada, la tolerancia o desviación GD&T y al equipo de digitalizado utilizado. Estos resultados permiten la evaluación tanto del patrón como del equipo de medición utilizados.

2.2 Objetivos iniciales del proyecto y grado de consecución

El objetivo principal del proyecto es el desarrollo de un patrón de características óptico para la calibración de diversos equipos de inspección sin contacto e ingeniería inversa. El proyecto también pretende el desarrollo de un procedimiento de calibración y verificación para estos equipos. La novedad reside en que este procedimiento se basa en una evaluación “multicaracterísticas”, mucho más completa que los

procedimientos actuales al extender la evaluación a múltiples tolerancias dimensionales y geométricas (GD&T).

Se ha conseguido este objetivo puesto que se ha diseñado, fabricado, y caracterizado un patrón que contiene entidades geométricas diversas para la evaluación de la mayoría de “desviaciones” dimensionales y geométricas (GD&T) definidas en la norma ISO. Además, la elección del material se ha realizado de forma que las características ópticas de las entidades facilitan el digitalizado de las mismas con la máxima cobertura y un alto grado de exactitud.

Así, el objetivo genérico puede desglosarse en otros más específicos:

- Se contempla una evaluación por características (GD&T) de los distintos equipos de Ingeniería Inversa disponibles. Con entidades dispuestas de forma que cubran el volumen de medición de estos equipos, permitiendo obtener nubes de alta precisión y con suficiente densidad. El patrón también debe ser fácilmente medible por contacto, lo que posibilitará su calibración para obtener medidas de referencia con baja incertidumbre.

Como se detallará más adelante en el apartado dedicado a la descripción de las tareas realizadas, se ha acometido una ambiciosa recopilación de características GD&T en base a diferentes entidades geométricas materializadas en el patrón desarrollado. Asimismo, se ha desarrollado una metodología para la evaluación de cada una de esas características, primero en una medición por contacto para obtener valores precisos considerados de referencia, y posteriormente, en digitalizados sin contacto realizados con diferentes equipos de ingeniería inversa.

- La calibración del patrón óptico por contacto permitirá generar un CAD modificado, cuyas dimensiones se adapten lo más posible al patrón físico. Este nuevo CAD, que denominamos “CAD cuasi-real”, permite hacer una verificación extra. En este caso sobre la capacidad de estos equipos para realizar comparativas CAD, dando bondad de aproximación de la nube de puntos digitalizada a la superficie real.

Uno de los requisitos exigibles al patrón es que su “calibración” (obtención de valores de referencia) pudiese ser acometida con los medios disponibles a un coste reducido. Por ello, se tuvo en cuenta en el diseño la accesibilidad para una medición utilizando palpadores por contacto en una Máquina de Medir por Coordenadas. Ello no sólo permitió una primera calibración del patrón sino la reverificación periódica del mismo. Como resultado adicional, se obtuvo un modelo CAD modificado denominado “CAD cuasi-real” que facilitó la posterior comparativa de resultados de medición obtenidos con otros equipos de medición.

- Los ensayos de validación del patrón, que se llevarán a cabo emulando calibraciones de los equipos con el nuevo patrón, obtendrán puntos de diferente calidad y densidad (en función de diversos parámetros tecnológicos de captura de cada equipo). También se pretende realizar una comparativa de las capacidades de medida de cada software: tipos de filtros, medidas de distancias, errores geométricos, y errores de forma.

La validación en sí del patrón conlleva el digitalizado del mismo empleando diferentes equipos de ingeniería inversa. Debido a las diferencias inherentes a cada equipo (manejo manual o automático, incorporación o no de filtros durante el digitalizado, parámetros de medición,...) fue necesario definir una metodología más o menos común y un valor consistente para el filtrado de las nubes de puntos obtenidas (como se comentará en el apartado 2.3). Como resultado final de la investigación, se confeccionaron tablas y gráficas donde se muestra la capacidad y exactitud de cada equipo en la evaluación GD&T del patrón.

- En el caso de hablar de calibración de equipos de ingeniería inversa, hablaríamos de asignación de incertidumbres; realizando análisis estadístico (EA-4/02 e ISO 15530-3:2011) o, en el caso de verificación, hablaríamos de obtención de las desviaciones máximas. En todo caso el patrón fabricado debe ser de precisión, y debe calibrarse previamente con suficiente trazabilidad.

A partir de los resultados obtenidos se puede concluir que el patrón es apto para la evaluación de características GD&T en mediciones realizadas con equipos ópticos de ingeniería inversa.

2.3 Tareas realizadas

En este apartado se abordarán las tareas incluidas en la memoria para la solicitud del proyecto, detallando el grado de consecución de las mismas:

- 1- Estudios Previos. Tecnologías de digitalizado e Ingeniería Inversa sin contacto.
- 2- Estudios Previos. Normativa y procedimientos de calibración de los equipos disponibles.
- 3- Diseño de patrón de características ópticas. Definición de metodología de evaluación.
- 4- Fabricación y montaje de los elementos del nuevo patrón en materiales cerámicos.
- 5- Calibración del patrón (CMM por contacto) y generación de CAD cuasi-real.
- 6- Ensayos de validación. Digitalización del patrón con las tecnologías disponibles.
- 7- Generación de resultados. Análisis y Comparativa (nubes de puntos vs. CAD cuasi-real).
- 8- Elaboración de informe técnico. Publicación resultados.

Tareas 1 y 2. Estudios previos

El candidato designado ya contaba con experiencia en el manejo tanto de equipos de digitalizado como del software necesario para la obtención de resultados de medición. No obstante, se ahondó en el conocimiento relativo a los procesos de inspección sin contacto y a los distintos softwares empleados en cada tecnológica disponible. Asimismo, se hizo una revisión actualizada de la normativa de calibración actual (relativa a medición por coordenadas), así como en los procedimientos de cálculo y expresión de incertidumbre de medida en calibración.

Grado de ejecución: 100%

Tarea 3. Diseño de patrón de características ópticas. Definición de metodología de evaluación

Para la realización de la investigación se ha diseñado un patrón de características ópticas (Fig. 1) compuesto por diferentes entidades geométricas montadas todas ellas sobre placas de fibra de carbono.

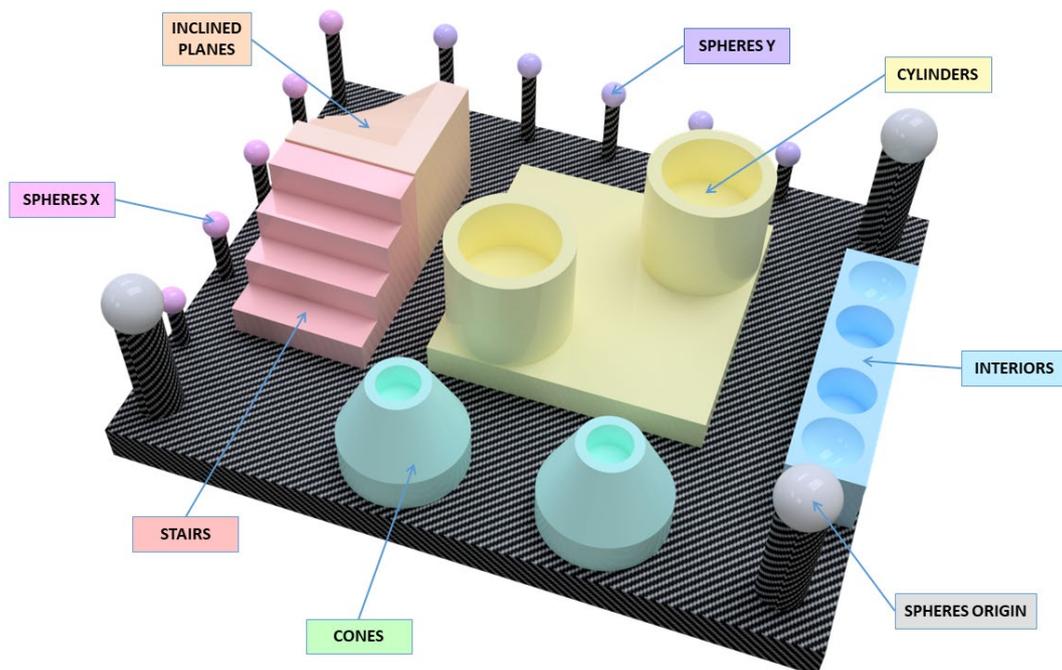


Figura 1. Patrón de características ópticas

Los materiales elegidos para las entidades de las que se compone el patrón se tratan de cerámica mecanizable MACOR (SiO₂ 46%, Al₂O₃ 16%, MgO 17%, K₂O 10%, B₂O₃ 7%, F 4%) y alúmina (Al₂O₃). El motivo de elección de estos materiales es debido a su alta precisión y su color, ya que el color blanco favorece la fácil captura de estos por parte de los equipos de ingeniería inversa que serán usados y dado que se trata de un patrón destinado a la evaluación de equipos de ingeniería inversa es la mejor elección.

El patrón se compone de diferentes entidades geométricas sobre las cuales poder evaluar todo tipo de tolerancias geométricas y dimensionales. En la tabla 1 se muestran las diferentes entidades geométricas de las que se compone el patrón, así como su material.

Tabla 1. Entidades del patrón cerámico y materiales

Geometric Entity	Material
Spheres	Alumina
Interior Spheres	MACOR
Cylinders	MACOR
Interior Cylinder	MACOR
Cones	MACOR
Planes	MACOR

En cuanto a la metodología para la evaluación metrológica se realizó un estudio para identificar cuáles serán las mediciones GD&T (tolerancias geométricas y dimensionales) que se realizarán sobre el patrón. Debido al gran número de entidades que se encuentran en el patrón y los diferentes tipos de geometrías de estas, se diseñó una tabla (Tabla 2) en la cual se ven reflejados todos los parámetros evaluados y las entidades, con su debida nomenclatura, que se ven afectadas en cada uno de ellos.

Tabla 2. Parámetros GD&T evaluados en el Patrón

	Distance 3D	Diameter	Form Error
SPHERES ORIGIN	SPH O - SPH X	SPH O	SPH O
	SPH O - SPH Y	SPH X	SPH X
	SPH X - SPH Y	SPH Y	SPH Y
SPHERES X	SPH X:1 - SPH X:2	SPH X:1	SPH X:1
	SPH X:1 - SPH X:3	SPH X:2	SPH X:2
	SPH X:1 - SPH X:4	SPH X:3	SPH X:3
	SPH X:1 - SPH X:5	SPH X:4	SPH X:4
		SPH X:5	SPH X:5
SPHERES Y	SPH Y:1 - SPH Y:2	SPH Y:1	SPH Y:1
	SPH Y:1 - SPH Y:3	SPH Y:2	SPH Y:2
	SPH Y:1 - SPH Y:4	SPH Y:3	SPH Y:3
	SPH Y:1 - SPH Y:5	SPH Y:4	SPH Y:4
		SPH Y:5	SPH Y:5
CYLINDERS	CYL X EXT - CYL Y EXT	CYL X EXT	CYL X EXT
	CYL X INT - CYL Y INT	CYL X INT	CYL X INT
	PLN BASE CYL XY - PLN SUP CYL X	CYL Y EXT	PLN SUP CYL X
	PLN BASE CYL XY - PLN SUP CYL Y	CYL Y INT	PLN INF CYL X
	PLN SUP CYL X - PLN INF CYL X		CYL Y EXT
	PLN SUP CYL Y - PLN INF CYL Y		CYL Y INT
CONES		CYL INT CON:1	CON:1
		CYL EXT CON:1	PLN SUP CON:1
		CYL INT CON:2	CYL INT CON:1
		CYL EXT CON:2	CYL EXT CON:1
			CON:2
			PLN SUP CON:2
		CYL INT CON:2	
		CYL EXT CON:2	

INTERIORS	SPH INT:1 - SPH INT:2 CYL INT:1 - CYL INT:2	SPH INT:1 CYL INT:1 CYL INT:2 SPH INT:2	SPH INT:1 CYL INT:1 CYL INT:2 SPH INT:2 PLN SUP INT
INCLINED PLANES			PLN INC A:0 PLN INC A:10 PLN INC A:20 PLN INC A:30 PLN INC A:40 PLN Y
STAIRS	PLN STA Z:1 - PLN STA Z:2 PLN STA Z:1 - PLN STA Z:3 PLN STA Z:1 - PLN STA Z:4 PLN STA X:1 - PLN STA X:2 PLN STA X:1 - PLN STA X:3 PLN STA X:1 - PLN STA X:4		PLN STA Z:1 PLN STA Z:2 PLN STA Z:3 PLN STA Z:4 PLN STA X:1 PLN STA X:2 PLN STA X:3 PLN STA X:4

	Angle	Parallelism	Perpendicularity	Coaxiality
CYLINDERS		CYL X EXT - CYL Y EXT CYL X INT - CYL Y INT PLN BASE CYL XY - PLN SUP CYL X PLN BASE CYL XY - PLN SUP CYL Y PLN SUP CYL X - PLN INF CYL X PLN SUP CYL Y - PLN INF CYL Y		CYL X EXT - CYL X INT CYL Y EXT - CYL Y INT
CONES	CON:1 CON:2	CON:1 - CON:2 CYL INT CON:1 - CYL INT CON:2		CYL INT CON:1 - CYL EXT CON:1 CYL INT CON:2 - CYL EXT CON:2
INTERIORS		CYL INT:1 - CYL INT:2		
INCLINED PLANES	PLN INC A:10 PLN INC A:20 PLN INC A:30 PLN INC A:40			
STAIRS		PLN STA Z:1 - PLN STA Z:2 PLN STA Z:1 - PLN STA Z:3 PLN STA Z:1 - PLN STA Z:4 PLN STA X:1 - PLN STA X:2 PLN STA X:1 - PLN STA X:3 PLN STA X:1 - PLN STA X:4	PLN STA Z:1 - PLN STA X:1 PLN STA Z:2 - PLN STA X:2 PLN STA Z:3 - PLN STA X:3 PLN STA Z:4 - PLN STA X:4	

Como se observa en la Tabla 2 los diferentes valores GD&T evaluados son:

- Distancia 3D entre centros de esferas, ejes de cilindros y planos.
- Diámetros de esferas y cilindros.
- Error de forma de esferas, planos, cilindros y conos.
- Ángulo de inclinación de planos y conos.
- Paralelismo entre cilindros, conos y planos.
- Perpendicularidad entre planos.
- Coaxialidad entre cilindros.

Las estrategias de medición del patrón para obtener los resultados de medición con cada una de las tecnologías utilizadas en el proyecto serían definidas al realizar la medición correspondiente.

Grado de ejecución: 100%

Tarea 4. Fabricación y montaje de los elementos del nuevo patrón en materiales cerámicos.

Una vez disponible el diseño definitivo, y adquiridos todos los materiales necesarios, se procedió a la fabricación y montaje de distintos elementos que conforman el patrón (esferas de distintos diámetros, cilindros exteriores, cilindros interiores, conos y planos en distintas posiciones).

Cabe mencionar aquí las dificultades para el mecanizado de varios de los elementos a partir del material cerámico Macor®, que conllevaron la elaboración de estrategias y selección de condiciones de corte específicas. Este trabajo ha sido recogido en una ponencia que se enviará al congreso internacional MESIC que se celebrará el próximo junio de 2021 en Gijón.

Grado de ejecución: 100%

Tarea 5. Calibración del patrón (MMC por contacto) y generación de CAD cuasi-real

Como se apuntó en la memoria para la solicitud del proyecto, por razones económicas, la calibración se hará internamente, con la Máquina de Medir por Coordenadas (MMC) disponible (DEA Global Image), y técnicamente por contacto, con la máxima precisión posible.

La realización de la medición por contacto del patrón (Fig.2) se hizo usando la maquina MMC modelo DEA Global Image 091508 montada con el palpador Renishaw SP25 y controlada a su vez mediante el software PC-DMIS 2018 R2 (Fig.3).

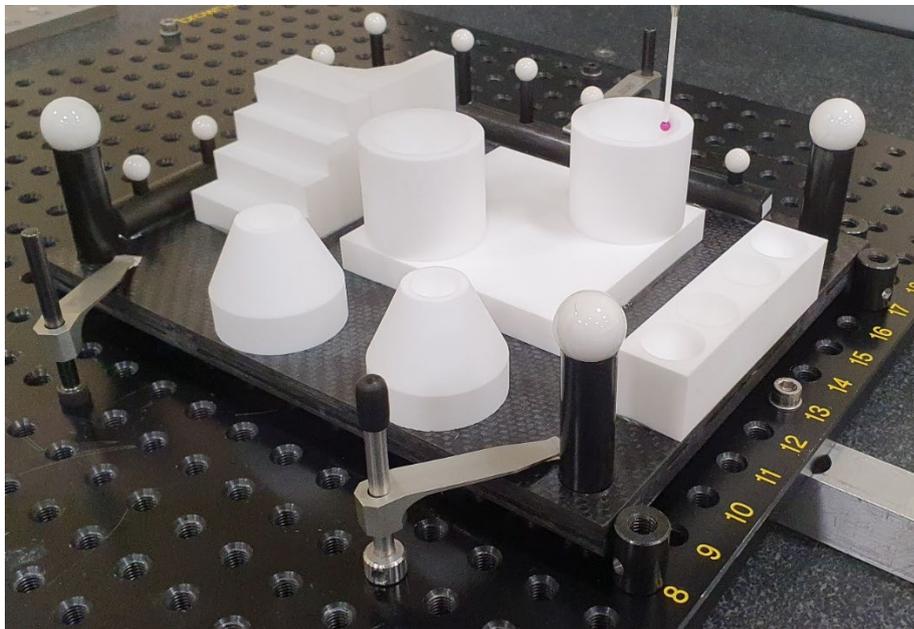


Figura 2. Medición por contacto del patrón en la MMC.

Antes de realizar la medición del patrón se realizó un estudio previo con el fin de obtener el número de puntos de palpado necesario en cada entidad para mantener una densidad (puntos/mm²) aproximadamente constante. En total se palparon 3720 distribuidos en las diferentes entidades. El patrón se midió a una temperatura controlada de 20°C según marca la norma y después de haberse realizado una calibración y ajuste de la Máquina de Medir por Coordenadas (MMC).

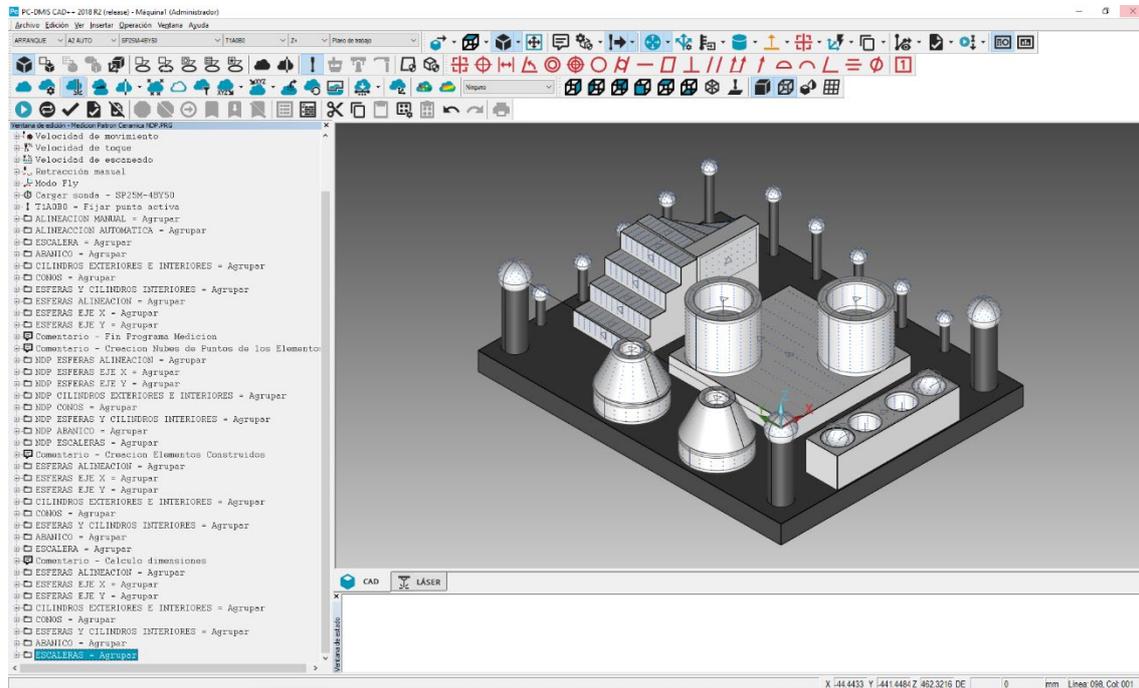


Figura 3. Programa de inspección realizado con el software PC-DMIS 2018 R2

En la elaboración del programa de medición por contacto en el software de metrología PC-DMIS se modificó la manera en la que se obtenían los datos de las entidades medidas para que coincidiera con el procedimiento de obtención de resultados en el software Geomagic Control X, con el cual se iban a tratar las nubes de puntos provenientes de los equipos de ingeniería inversa. Aunque PCDMIS permite obtener los resultados de medición a partir de las entidades creadas automáticamente con los puntos palpados por contacto, en este caso, se optó por crear nubes de puntos con los puntos pertenecientes a estas entidades automáticas, para luego reconstruir de nuevo las entidades en base a las nubes de puntos y finalmente obtener los datos de medición de las evaluaciones GD&T. Como se trata de una investigación destinada a equipos de ingeniería inversa y los datos pertenecientes a estos se obtienen en base a nubes de puntos, se decidió seguir el mismo procedimiento para los datos obtenidos por contacto y así evitar posibles errores de software que falsearan las futuras comparativas entre equipos.

Después de la medición por contacto en la MMC, también se realizó una medición de la rugosidad superficial de los elementos cerámicos del patrón, observándose que en todos los casos la rugosidad medida no superaba los 2 micrómetros, que es el valor umbral de repetibilidad de la MMC, lo que garantiza un nivel alto de exactitud de las mediciones.

Con objeto de analizar posteriormente los distintos equipos, no solo evaluando los elementos de forma individual sino con tolerancias entre ellos, se generó un nuevo CAD (CAD cuasi-real). Este CAD se obtiene modificando el anterior, de forma que se ajusten las dimensiones de los elementos y sus distancias, a las reales (medidas por contacto). Esto permite la evaluación de los distintos equipos de ingeniería inversa (hardware+software) mediante la comparativa CAD.

Grado de ejecución: 100%

Tarea 6, 7 y 8. Ensayos de validación. Digitalización del patrón con las tecnologías disponibles. Generación de resultados. Análisis y Comparativa (nubes de puntos vs. CAD cuasi-real). Elaboración de informe técnico. Publicación resultados.

Para validar el patrón óptico se procedió a la medición de los valores GD&T con tres equipos de medición ópticas sin contacto (sensores laser de triangulación) cuyas características están recogidas en la tabla 3.

Tabla 3. Equipos usados en la investigación y características de estos

Sensor Láser de Triangulación montado en Máquina de Medir por Coordenadas	Sensor Láser de Triangulación montado en Brazo de Medir por Coordenadas	Sensor Láser de Triangulación manual
HP-L-10.6® de Hexagon Metrology	Láser Escáner RS6 montado sobre brazo Absolute Arm 8525-7 de Hexagon Metrology	HandySCAN 700™ de Creaform
		
Ratio de adquisición: 30000 ptos/s	Ratio de adquisición: 1.2 millones ptos/s	Ratio de adquisición: 480000 ptos/s
Standoff: 170 ± 30 mm	Puntos por línea: max. 4000	Standoff: 300 mm
Líneas por segundo: 53 Hz	Standoff: 165 ± 50 mm	7 láseres transversales + 1 línea adicional
Ancho de línea: 24, 60 y 123 mm	Líneas por segundo: max. 300 Hz	Área de escaneado: 275 x 250 mm
PForm.Sph.D95%:Tr:ODS (MPL) Probe dispersion value: 34 µm	Ancho de línea: 150 mm	Resolución: 0.050 mm
PForm.Sph.1x25:Tr:ODS (MPE) Probing form error: 22 µm	Precisión: 0.026 mm (2σ)	Precisión: Hasta 0.030 mm
	Espaciado mínimo entre puntos: 0.027 mm	Precisión volumétrica: 0.020 + 0.060 mm/m

En esta fase se siguieron los pasos de la metodología mostrada en la Fig. 4 para llevar a cabo la investigación (a excepción de la medición por contacto que ya se había realizado anteriormente).

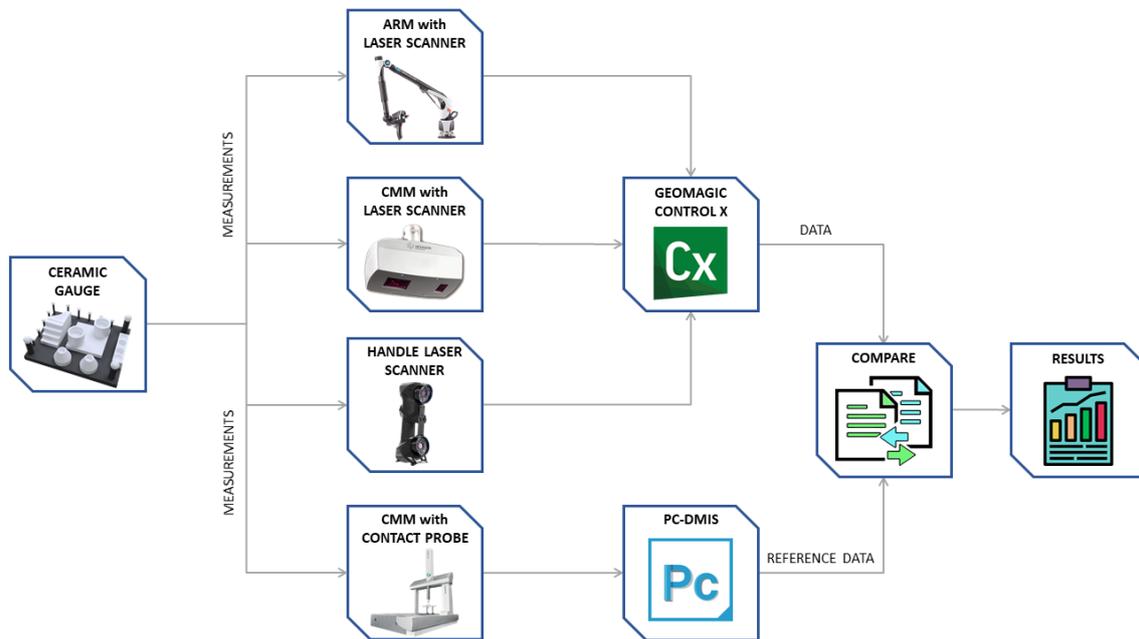


Figura 4. Metodología para la comparación de resultados

En el apartado relativo a las mediciones, el objetivo de escaneado para los 3 equipos era el de cubrir por completo las diferentes entidades del patrón. Las mediciones realizadas con cada uno de los equipos se realizaron en el mismo laboratorio que la medición por contacto y a una temperatura controlada de 20°C como indica la norma.

En estos equipos existen filtros controlados por software que consiguen mejorar el resultado del escaneado eliminando aquellos puntos (denominados espúreos, outliers o redundantes, según su tipo) que hagan aumentar sensiblemente el error de las medidas. El principal filtro que existe es el anti-solapamiento que evita que se solapen escaneos distintos de una misma zona eliminando los puntos redundantes. Los equipos que poseen softwares de control que aplican este tipo de filtro son: RS6 y HandyScan. Otro filtro aplicado durante la obtención de las nubes de puntos es el denominado filtro de ángulo de incidencia, que descarta aquellos puntos capturados cuyo vector normal asociado forma un ángulo con la dirección del cabezal digitalizador mayor que un ángulo establecido como valor de filtrado.

No obstante, fue necesario aplicar un filtrado posterior a las nubes de puntos obtenidas durante el digitalizado antes de evaluar los valores GD&T a las entidades del patrón. Por anteriores investigaciones realizadas se sabe que el mejor filtro para la creación de entidades en base a nubes de puntos es el de tipo Sigma o Desviación Estándar. Este filtro descarta los puntos que se encuentran a una distancia superior a la de x veces la desviación estándar de la nube de puntos perteneciente a una entidad. El estudio del filtro se realizó con la ayuda del software Geomagic Control X. La metodología que se ha usado para la aplicación del filtro tipo Sigma es la siguiente:

- Creación de la entidad sin ningún tipo de filtro.
- Obtención de la desviación estándar de la entidad.
- Multiplicación de la desviación estándar por el factor que se quiera aplicar en ese momento.
- Creación de la nueva entidad aplicando el filtro tipo: Distancia máxima entre puntos, en el cual el valor de la distancia es el calculado anteriormente para la desviación estándar después de multiplicar esta por el factor deseado.

Con los resultados de este estudio se decidió que el mejor factor de multiplicación para el filtro Sigma o desviación estándar sería de 2. Las entidades se construyeron entonces con aproximadamente el 96% de los puntos, lo que hace que se descarten los posibles puntos espúreos y que los valores de los parámetros evaluados

estén dentro de unos valores aceptables. Se asegura la eliminación de puntos que pueden dar lugar a datos erróneos, pero sin llegar a eliminar puntos en exceso y falsear las medidas de los equipos.

Una vez determinado el valor del factor multiplicador filtro Sigma, se procedió a la reconstrucción de las entidades del patrón para su evaluación posterior mediante comparación con los resultados obtenidos por contacto (valores de referencia). En primer lugar, cada nube de puntos global (habría una nube global por cada tecnología empleada) se limpia y se separa en varias nubes de puntos cada una de las cuales corresponde a una entidad distinta del patrón (Fig. 5).

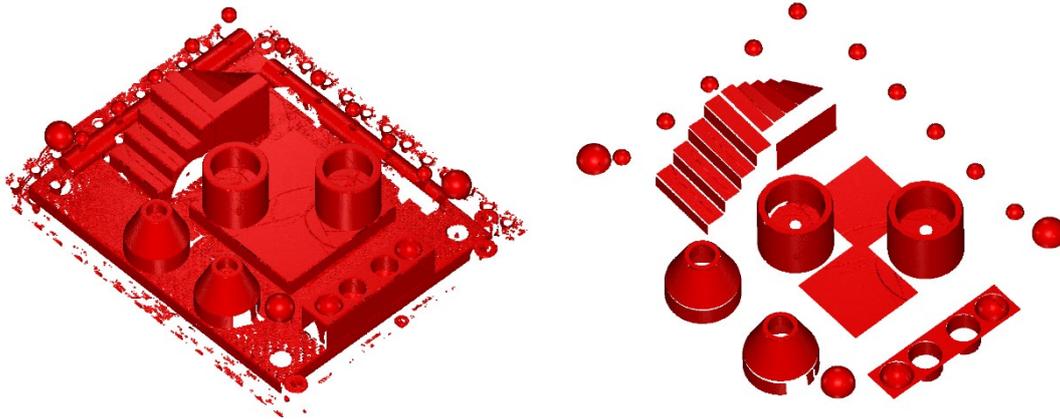


Figura 5. Nube de puntos (sensor láser HP-L-10.6) antes y después de eliminar los puntos no pertenecientes a las entidades evaluadas.

En segundo lugar, se determinó el valor del filtro 2 Sigma para cada entidad siguiendo la misma metodología que se realizó en el estudio previo, es decir, reconstruir todas las entidades sin aplicar ningún filtro para obtener su valor de desviación estándar y multiplicar este valor por 2. Determinado el valor del filtro 2 Sigma, se procedió a volver a construir las entidades, pero esta vez aplicando el filtro de distancia máxima, introduciendo el valor de 2 Sigma de cada entidad como valor de la distancia para ese filtro.

En tercer lugar, se realizó una alineación de la nube de puntos con el CAD cuasi-real (Fig. 6).

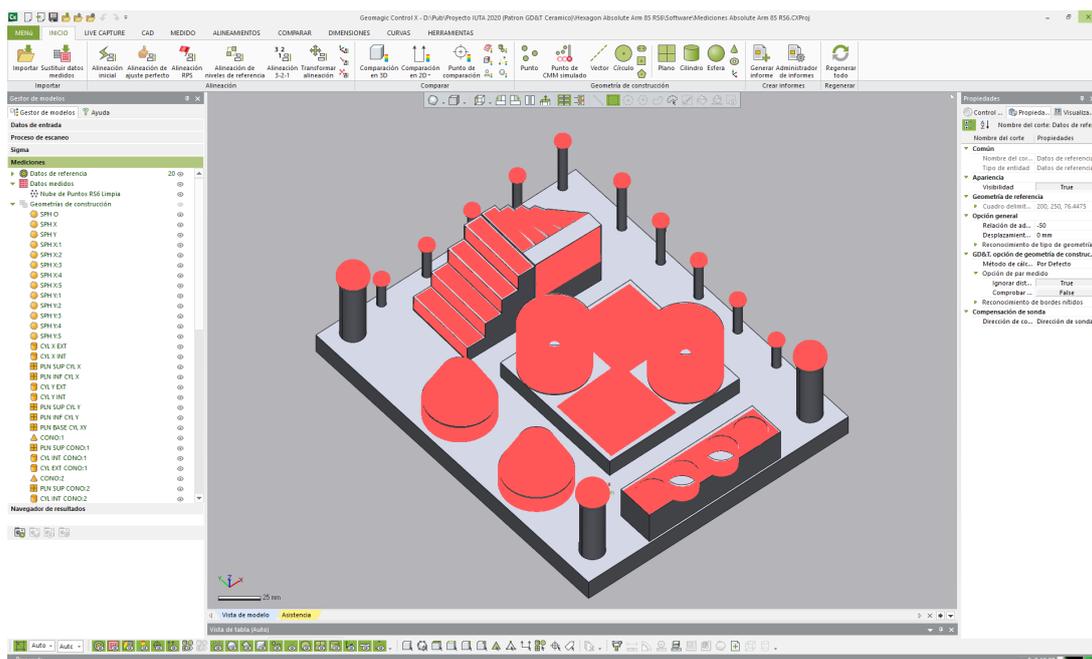


Figura 6. Nube de puntos alineada con el CAD cuasi-real

Con la alineación hecha se procede a construir definitivamente las entidades que forman el patrón cerámico, obteniendo una representación gráfica (Fig.7) en la que se ven todas las entidades que lo forman construidas en base a nubes de puntos.

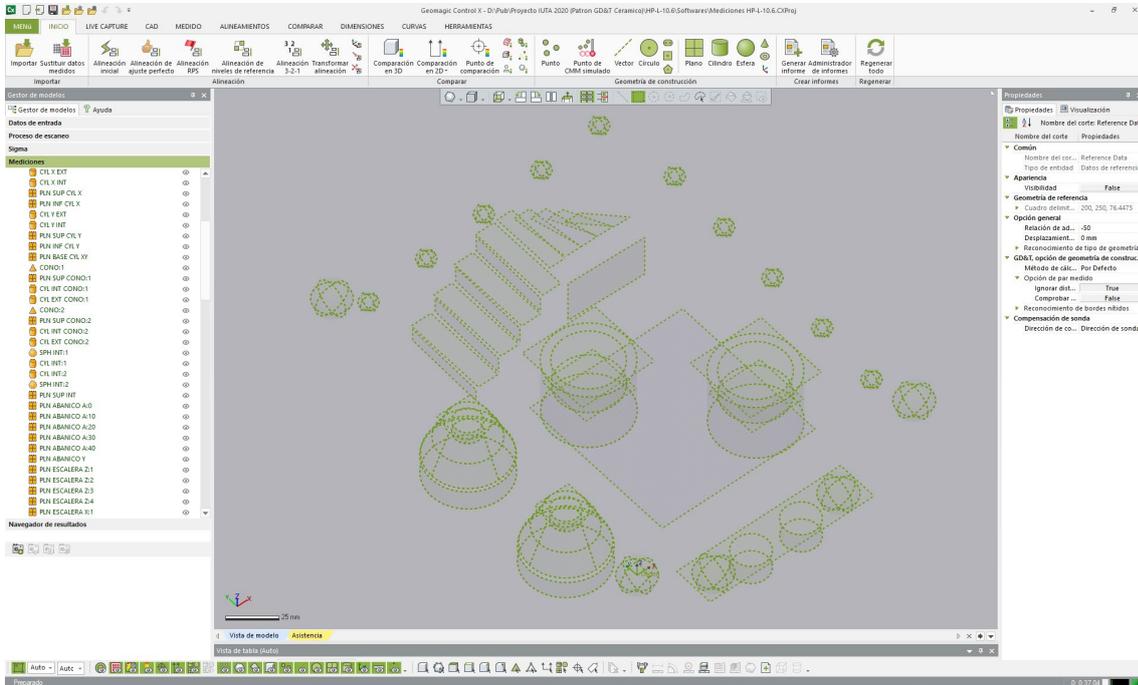


Figura 7. Entidades del patrón reconstruidas en base a las nubes de puntos

A continuación, se realizó el estudio GD&T sobre estas mismas entidades (Fig. 8) en el que se obtienen los resultados de medición que se expondrán brevemente en el apartado 2.4 Resultados obtenidos.

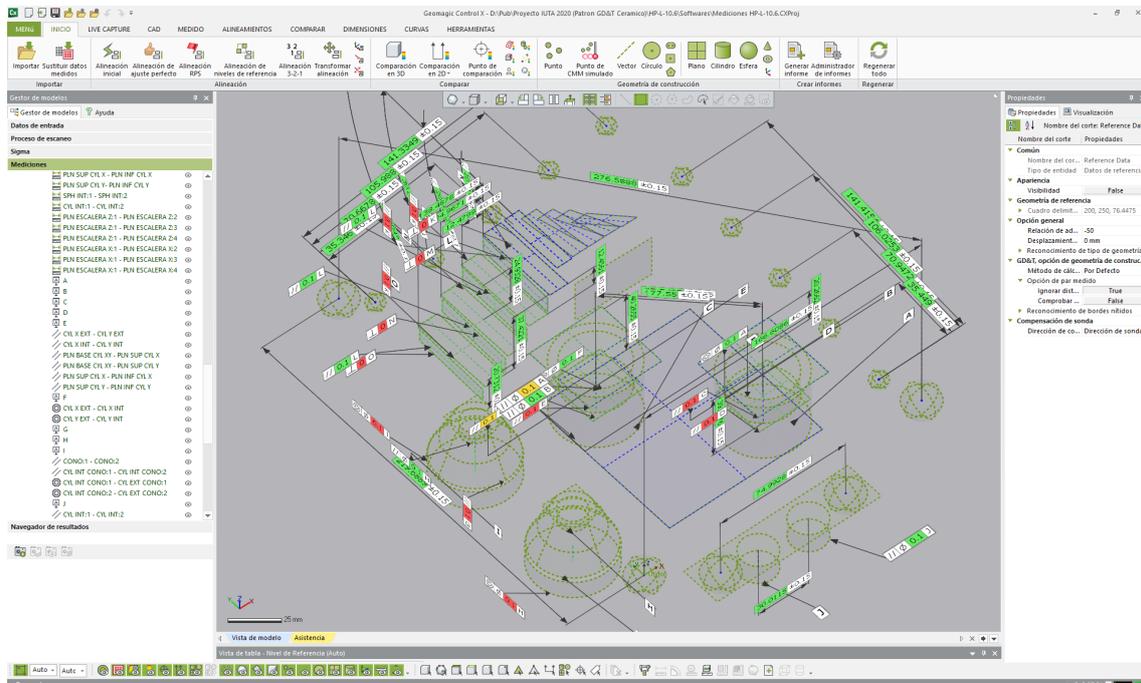


Figura 8. Estudio GD&T del Patrón Cerámico en el software Geomagic Control X para las entidades creadas en base a una nube de puntos

Se generaron los resultados, y las respectivas comparativas entre equipos. Se analizó la bondad y calidad (grado de aproximación al valor real) de las nubes de puntos para las entidades independientes, así como para la nube de puntos global, de todas las entidades, respecto al CAD-cuasi real (CAD compare).

Grado de ejecución: 90%

2.4 Resultados obtenidos

Como resultados de la investigación realizada se destacan los siguientes:

- Materialización de un patrón de características para equipos óptico

Se ha diseñado, fabricado y caracterizado con un grado de exactitud elevado un patrón que incorpora características geométricas para evaluación GD&T en un material que se ha demostrado apto para la verificación con una de las principales tecnologías ópticas sin contacto (triangulación láser).

- Establecimiento de una metodología consistente para el filtrado de nubes de puntos

Como parte del proyecto de investigación se ha establecido una metodología para el filtrado de las nubes de puntos basada en la determinación del factor de multiplicación óptimo para un filtro Sigma que permite la obtención de nubes “consistentes” para la comparación entre diferentes equipos de digitalizado.

- Comparativa “GD&T” con respecto a CAD cuasi-real (valores obtenidos por medición con contacto)

Se han obtenido los resultados de medición de las características GD&T previamente definidas (tabla 2) para cada uno de los equipos disponibles en la investigación. También se han realizado gráficas comparativas de los resultados relativos a cada características (como ejemplo véanse la Fig. 9 y 10).

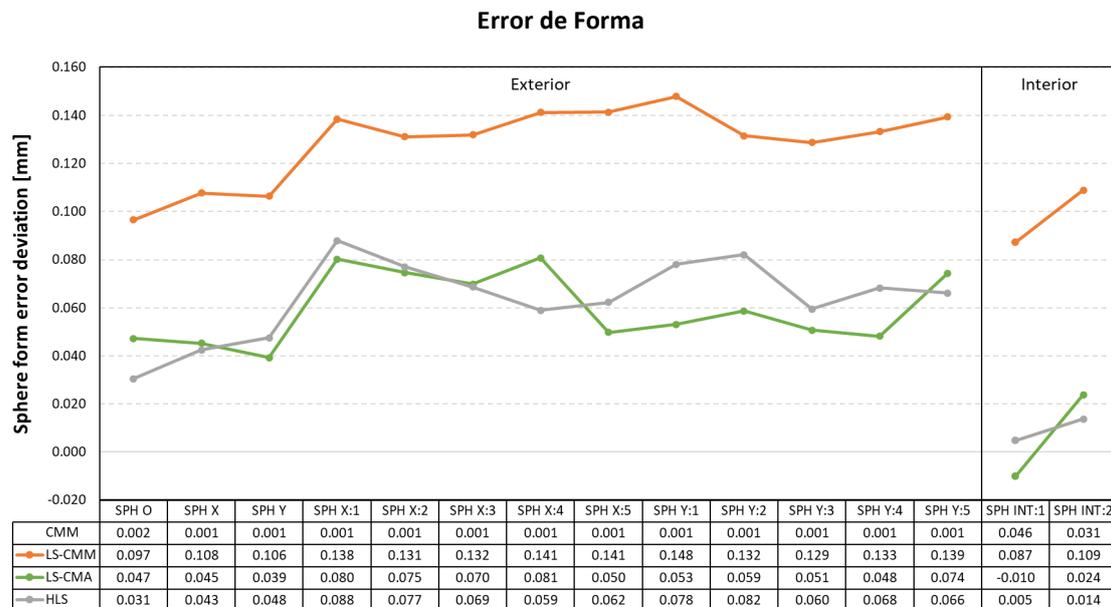


Figura 9. Resultados de medición para evaluación del error de forma de las esferas (CMM: Máquina de Medir por Coordenadas – contacto; LS-CMM: Escáner Láser montado en la MMC; LS-CMA: Escáner láser montado en el Brazo de Medir; HLS: Escáner Láser manual HandyScan)

Paralelismo

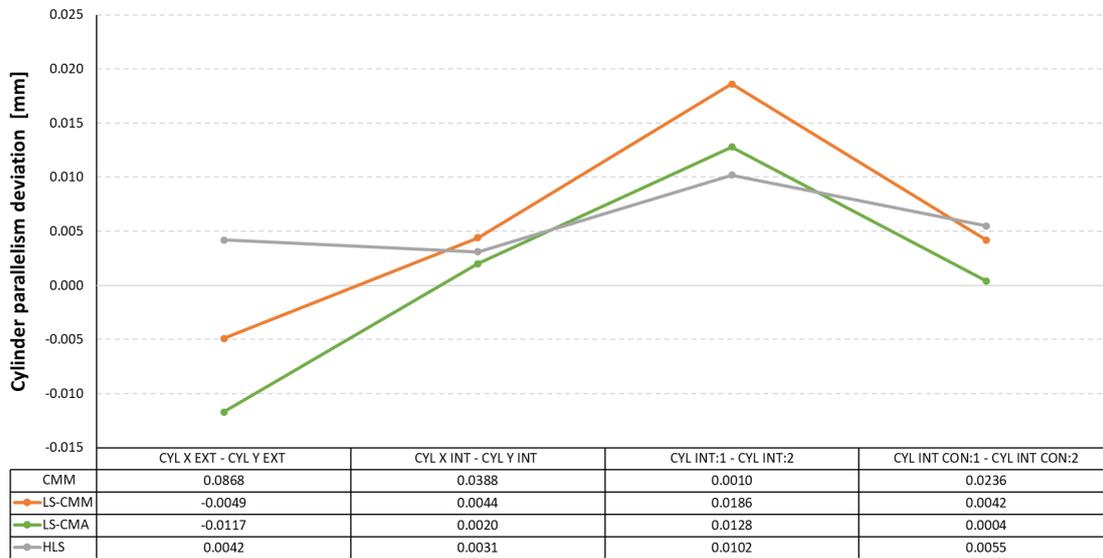


Figura 10. Resultados de medición para evaluación del paralelismo entre cilindros y conos (CMM: Máquina de Medir por Coordenadas – contacto; LS-CMM: Escáner Láser montado en la MMC; LS-CMA: Escáner láser montado en el Brazo de Medir; HLS: Escáner Láser manual HandyScan)

Asimismo, también se han realizado gráficas comparativas entre los diferentes equipos ópticos de triangulación láser con el objetivo de mostrar cuál de ellos proporciona mayor exactitud en la reconstrucción de entidades (Fig. 11).

Comparacion Equipos

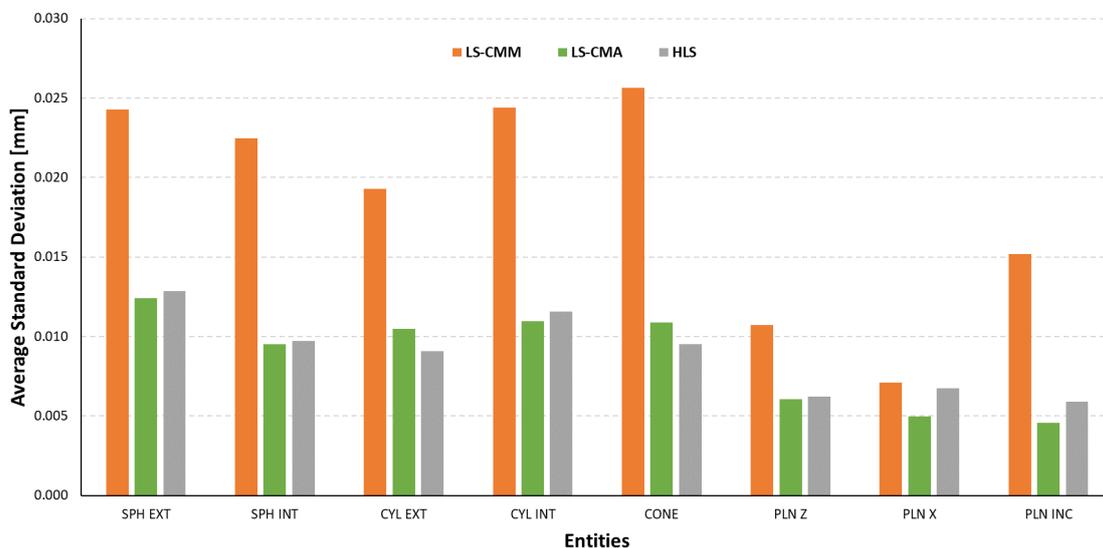


Figura 11. Desviación estándar de diversas entidades reconstruidas a partir del digitalizado con equipos ópticos de triangulación láser (LS-CMM: Escáner Láser montado en la MMC; LS-CMA: Escáner láser montado en el Brazo de Medir; HLS: Escáner Láser manual HandyScan)

2.5 Trabajos o necesidades futuras

Siguiendo con la línea de investigación descrita en este proyecto, se abren dos líneas que complementan el trabajo realizado hasta el momento:

- Asignación de incertidumbres de medición en equipos de digitalizado sin contacto

Aparte de la comparación proporcionada entre resultados de medición según diferentes equipos de digitalizado sin contacto, sería deseable poder asignar una incertidumbre de medición que considerase tanto la capacidad del equipo como la incertidumbre del patrón o la incertidumbre derivada de los métodos de filtrado de la nube de puntos que se hayan aplicado.

- Extender la investigación a otras tecnologías de digitalizado sin contacto

En este trabajo se han mostrado resultados derivados de la utilización de una de las tecnologías de digitalizado sin contacto, la basada en la triangulación láser, pero existen otras tecnologías, como la luz estructurada o la holografía conoscópica, que podrían también ser susceptibles de una evaluación como la aquí mostrada.

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

Se ha enviado un resumen al congreso MESIC-2021, organizado por la Sociedad de Ingeniería de Fabricación (9th Manufacturing Engineering Society International Conference, Gijón, Spain, 23-25 June 2021).

En el correspondiente apartado de "Acknowledgements" se hará referencia expresa a la ayuda concedida.

El título, los autores y la referencia del mismo son:

Feasibility of machinable glass ceramics to manufacture metrological artefacts for non-contact measurement, 9th Manufacturing Engineering Society International Conference MESIC-2021, Gijón, Spain.

P. Zapico, B. Alvarez, V. Meana, A. Telenti, E. Cuesta.

3. Memoria económica

Financiación		Personal	Inventariable	Fungible	Otros gastos
IUTA	SV-19-GIJÓN-1-03	4000 €	0	0	0
Otras fuentes	Referencia proyecto/contrato				
Estudiante con ayuda a la investigación	Nombre	Pablo Pastur Ortiz de Urbina			
	Tareas	Colaboración en todas las fases del proyecto			
	Período	Septiembre a Diciembre de 2020			

4. Otros proyectos y contratos con financiación externa

Título del proyecto/contrato	
Referencia	
Investigador/a/es principal/es	
Equipo investigador	
Periodo de vigencia	
Entidad financiadora	
Cantidad subvencionada	