



Universidad de
Oviedo



ESCUELA POLITÉCNICA DE INGENIERÍA DE GIJÓN.

GRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA

ÁREA DE INGENIERÍA DE LOS PROCESOS DE FABRICACIÓN

TRABAJO FIN DE GRADO N° TFG19010133

**DIGITALIZADO DE COMPONENTES OBTENIDOS POR
FABRICACIÓN ADITIVA MEDIANTE TÉCNICAS DE HOLOGRAFÍA
CONOSCÓPICA**

**D. Yeraí FERNÁNDEZ GUTIÉRREZ
TUTOR: D. José Carlos RICO FERNÁNDEZ
COTUTOR: D. Pedro FERNANDEZ ALVAREZ**

FECHA: JUNIO/2019

Índice

1.-	Introducción y objetivos	8
2.-	Estado de la técnica.....	12
2.1.-	Tecnologías para el digitalizado sin contacto	12
2.1.1.-	Tiempo de vuelo	13
2.1.2.-	Triangulación láser	14
2.1.3.-	Diferencia de fase	16
2.1.4.-	Holografía Conoscópica (HC)	16
2.1.5.-	Luz estructurada.....	17
2.1.6.-	Luz modulada	18
2.1.7.-	Sistemas estereoscópicos	19
2.1.8.-	Silueta	19
2.2.-	Integración de sensores de digitalizado sin contacto en máquinas de coordenadas	20
2.3.-	Holografía conoscópica.....	22
2.3.1.-	Principio de funcionamiento	22
2.3.2.-	Características de la HC frente a otras técnicas de digitalizado sin contacto	24
3.-	Metodología de experimentación.....	27
3.1.-	Equipos a utilizar.....	27
3.1.1.-	Conoscan 4000.....	27
3.1.2.-	ConoPoint 10	37
3.1.3.-	Impresora 3D BCN Sigma	44
3.2.-	Probetas y utillajes	53

3.2.1.- Probetas	53
3.2.2.- Utillajes.....	56
3.3.- Diseño de experimentos	64
4.- Análisis de datos	68
4.1.- Capacidad de digitalizado mediante HC.....	68
4.2.- Capacidad para medir el espesor de capa depositada	71
5.- Conclusiones.....	74
6.- Planificación y Presupuesto.....	76
7.- Referencias	83

Índice de Figuras

Figura 2.1: Aplicaciones del digitalizado sin contacto	12
Figura 2.2: Principio de funcionamiento del TOF	14
Figura 2.3: Principio de funcionamiento de la triangulación láser	15
Figura 2.4: Equipo de medición de diferencia de fase	16
Figura 2.5: Principio de funcionamiento de la holografía conoscópica.....	17
Figura 2.6: Principio de funcionamiento de la luz estructurada	18
Figura 2.7: Principio de funcionamiento de la luz modulada	18
Figura 2.8: Principio de funcionamiento de los sistemas estereoscópicos	19
Figura 2.9: MMC	20
Figura 2.10: Palpador MMC	20
Figura 2.11: Sistemas de digitalizado sin contacto incorporados en MMC.....	21
Figura 2.12: Principio de funcionamiento de la Interferometría.....	22
Figura 2.13: Funcionamiento cristal birrefringente	23
Figura 2.14: Funcionamiento Polarizador.....	23
Figura 2.15: Componentes de un sensor de Holografía Conoscópica	24
Figura 2.16: Patrones de interferencia	24
Figura 2.17: Variación del rango de medida del sensor de HC	25
Figura 2.18: Ventaja sistema colineal frente sistema triangulación.....	25
Figura 2.19: a-Medición de diferentes materiales y colores b- Medición de zonas de difícil acceso c- Medición de superficies angulares.....	26

Figura 3.1: Escáner Conoscan 4000	27
Figura 3.2: Mediciones obtenidas con Conoscan 4000	28
Figura 3.3: Pantalla principal.....	29
Figura 3.4: Menú alternativo zona II	29
Figura 3.5: Visor de nube de puntos	30
Figura 3.6: Selección de la lente.....	31
Figura 3.7: Posicionamiento de la cámara.....	31
Figura 3.8: Ajuste de altura del sensor	32
Figura 3.9: Onda de digitalizado	32
Figura 3.10: Ajuste de la frecuencia del láser.....	33
Figura 3.11: Selección del tipo de barrido.....	33
Figura 3.12: Elección del área a digitalizar	33
Figura 3.13: Barridos tipo línea y tipo spline	34
Figura 3.14: Configuración del material.....	35
Figura 3.15: Densidad del digitalizado	35
Figura 3.16: Realización del digitalizado	36
Figura 3.17: Elección de archivos de exportación.....	36
Figura 3.18: Sensor de HC Conopoint 10.....	37
Figura 3.19: Dimensiones del sensor Conopoint 10.....	38
Figura 3.20: Sensor Conopoint 10 conectado con su caja de comunicación.....	39
Figura 3.21: Esquema de conexión del sensor con un ordenador.....	39

Figura 3.22: Esquema de los parámetros de la lente (Working Range y Stand-Off).....	41
Figura 3.23: Impresora 3D BCN Sigma.....	44
Figura 3.24: Impresión simultánea.....	45
Figura 3.25: Bobina de filamento	47
Figura 3.26: Boquillas de impresión	47
Figura 3.27: “Cama” de impresión	48
Figura 3.28: Pieza con soportes hidrosolubles.....	49
Figura 3.29: Software BCN3D Cura.....	49
Figura 3.30: Aspecto de un archivo STL	50
Figura 3.31: Pantalla de configuración del software Cura.....	51
Figura 3.32: Aspecto archivo G-code	51
Figura 3.33: Pantalla de comunicación de la impresora	52
Figura 3.34: Dimensiones Probetas	53
Figura 3.35: Agujero cónico probetas.....	55
Figura 3.36: Alzado probetas	55
Figura 3.37: Perspectiva probetas	55
Figura 3.38: Posicionador de bola.....	57
Figura 3.39: Agujero Soporte.....	57
Figura 3.40: Ranuras Soporte.....	58
Figura 3.41: Agujero para pasador en el Soporte.....	58
Figura 3.42: Relleno tipo rejilla	59

Figura 3.43: Vista en perspectiva placa base probetas	59
Figura 3.44: Vista lateral placa base probetas	59
Figura 3.45: Vista de la planta inferior de la placa base probetas	60
Figura 3.46: Vista en perspectiva de pieza soporte	60
Figura 3.47: Vista en planta pieza soporte.....	60
Figura 3.48: Vista en alzado del conjunto: mesa, soporte, placa base y probeta.....	61
Figura 3.49: Vista en planta del conjunto: mesa, soporte, placa base y probeta	61
Figura 3.50: Vista en perspectiva del conjunto: mesa, soporte, placa base y probeta....	62
Figura 3.51: Probetas montadas sobre su base	62
Figura 3.52: Soporte para las probetas con posicionador	63
Figura 3.53: Probetas y soporte colocados sobre la mesa de digitalizado.....	63
Figura 3.54: Montaje para realizar los ensayos	64
Figura 3.55: Posición de las áreas de digitalizado respecto al origen de máquina	65
Figura 3.56: Distribución del SNR y del Total para un parche de digitalizado.....	66
Figura 4.1: Proporción (%) de puntos capturados en función del color y número de capas depositadas	69
Figura 4.2: Valores del indicador <i>SNR</i> en función del color y el espesor de capa	70
Figura 4.3: Valores del indicador <i>Total</i> en función del color y espesor de capa.....	70
Figura 4.4: a) Perfil medido en la probeta azul a una distancia $X = 99,03$ mm para 3 capas (espesor 0,3 mm); b) Detalle del perfil de transición entre puntos internos y externos del círculo.....	72
Figura 6.1: Diagrama de Gantt del proyecto	78

Índice de Tablas

Tabla 3.1: Rango de trabajo de la lente 25 Gold.....	31
Tabla 3.2: Valores límite digitalizado.....	35
Tabla 3.3: Parámetros de las lentes.....	41
Tabla 3.4: Valores de SNR y Total recomendados por el fabricante.....	43
Tabla 3.5: Resolución de posicionado	45
Tabla 3.6: Codificación de los ensayos.....	66
Tabla 4.1: Valores de los espesores de capa y sus desviaciones respecto al valor nominal	73
Tabla 6.1: Planificación proyecto	76
Tabla 6.2: Fechas planificación	77
Tabla 6.3: Coste Recursos Humanos	79
Tabla 6.4: Coste Software.....	80
Tabla 6.5: Coste Equipos	80
Tabla 6.6: Coste Materiales	81
Tabla 6.7: Coste Recursos Materiales.....	81
Tabla 6.8: Presupuesto proyecto	82

1.- Introducción y objetivos

La fabricación aditiva (FA) consiste en la fabricación directa de productos a partir de modelos CAD utilizando un proceso de fabricación por capas. Al contrario de los procesos tradicionales de moldeo o mecanizado, la FA fabrica productos por adición de material capa a capa sin necesidad de herramientas específicas ni utillajes. De esta forma, la FA permite la fabricación de productos con formas geométricas complejas pero asociados a pequeños lotes de producción.

Durante los últimos años, el sector de la fabricación aditiva ha experimentado un importante crecimiento, dejando de ser solamente una herramienta para la fabricación de prototipos y convirtiéndose en un sistema consolidado para la obtención de piezas acabadas. La rapidez de fabricación y su bajo coste, junto a una alta flexibilidad en los modelos, han sido claves en el auge de dicha técnica.

Aunque se pueden fabricar piezas de otros materiales (cerámica, composites, etc.), las principales técnicas de fabricación aditiva utilizadas en la industria se pueden clasificar en dos grandes grupos: fabricación aditiva para piezas de plástico y fabricación aditiva para piezas metálicas, siendo la primera la más implantada y desarrollada en el mundo industrial.

Hay diversas técnicas de fabricación aditiva con un uso extendido en la industria. Una de ellas es el Fused Deposition Modelling (FDM), también conocido como Fused Filament Fabrication (FFF), proceso basado en un cabezal que se mueve en un plano y funde un filamento de plástico, depositando el material capa a capa. Otra técnica es la Estereolitografía (SLA), la cual consiste en la obtención de piezas a partir de resinas líquidas que se curan con un haz de luz. Esta técnica ha evolucionado recientemente hacia otra conocida como Polyjet, cuyo principio de funcionamiento es el mismo, a excepción de luz utilizada, que en este caso es luz ultravioleta. La Fusión selectiva de lecho de polvo es también una técnica muy utilizada, que consiste en el depósito de una capa de material para la posterior fusión selectiva de la misma. La pieza se obtiene a partir de la fusión y posterior resolidificación capa a capa. Por último, cabe destacar también, por su alto uso industrial, a la Inyección directa de material, técnica que consiste en la fusión de un material base para inyectar otro material en el baño fundido. Esta técnica se emplea fundamentalmente para añadir detalles o estructuras sobre una pieza previamente fabricada.

El principal problema que presentan las piezas obtenidas por FA es la calidad (precisión geométrica y dimensional, acabado superficial, propiedades volumétricas, errores volumétricos, etc.), estando todavía muy lejos de la alcanzada por moldeo o mecanizado. Por ello, es necesario, sobre todo cuando las exigencias de calidad sean importantes, tanto de acabado superficial como de tolerancia dimensional, realizar operaciones de acabado posteriores. Por este motivo resulta prioritario mejorar la precisión en la obtención de productos mediante FA.

Este problema no afecta por igual a todas las técnicas de fabricación, siendo los procesos realizados mediante FFF e inyección directa de material los que consiguen peores calidades.

Como solución al citado problema, se utilizan sistemas de control que permiten analizar la precisión de las piezas obtenidas para poder implantar acciones de mejora. Actualmente, todos los sistemas empleados son externos a las células de fabricación, basando su funcionamiento en recoger una muestra previamente fabricada, realizarle las oportunas mediciones fuera de máquina, analizar las desviaciones obtenidas en la medición y compararlas con el diseño correspondiente, pudiendo tras ello, implantar las correcciones pertinentes en el diseño de la pieza que permitan fabricar de nuevo el componente con las mejoras aplicadas.

Integrar sistemas de control en máquina sería muy interesante para afrontar la mejora de la precisión en este tipo de fabricación. Todavía no existen, pero nos proporcionarían un seguimiento de la fabricación de la pieza durante el tiempo que es llevada a cabo, permitiendo analizar las desviaciones en tiempo real, e incluso, automáticamente. De esta forma, se podrían implantar correcciones en capas sucesivas de pieza, mejorando de esta forma su precisión sin que fuese necesario esperar a tener la pieza ya terminada.

Para alcanzar este objetivo se podrían implantar diferentes técnicas de inspección, todas ellas sin contacto, ya que la manera de operar de estas células de fabricación nos hace imposible poder utilizar técnicas con contacto, ya sea debido a la temperatura de la pieza en el transcurso de la impresión, al difícil acceso al área de impresión debido a la estanquidad de muchos equipos, al tiempo de operación necesario, y a otro gran número de factores que nos impiden tener contacto directo con la pieza.

Hay diferentes técnicas de medición sin contacto de un gran uso en la actualidad, y no solo válidas en el campo de la ingeniería, sino también en campos como la medicina, el arte, etc. Técnicas como el digitalizado de puntos, bien sea con un funcionamiento basado en la triangulación láser, en la fotogrametría o en la holografía conoscópica, así como técnicas de reconocimiento óptico como las cámaras de visión, gozan de un gran mercado en la industria actual, repercutiendo sobre las mismas con unos grandes avances en su desarrollo y mejora.

Todas estas técnicas mencionadas pueden ser de gran utilidad para afrontar el problema de la baja precisión en la obtención de piezas mediante FA, siendo técnicas de medición que se pueden integrar en las propias máquinas, proporcionando así la posibilidad de mejora de calidad de las piezas durante el propio proceso de fabricación.

Dado que se trata de medir y posteriormente corregir cada una de las capas de material depositado durante la fabricación, entre los inconvenientes a los que se enfrentan todas estas técnicas para su implantación, destaca la necesidad de reconocer con suficiente precisión el borde de cada capa (contorno y espesor). Las piezas obtenidas por fabricación aditiva son, en la mayoría de las ocasiones, piezas no muy grandes pero que pueden incluir numerosos detalles sujetos a importantes restricciones de calidad, bien para asegurar un correcto ensamblado en un conjunto o para que cumpla con una determinada funcionalidad. Esto conlleva que los sistemas sin contacto que se utilicen deberán contar con la suficiente precisión de medición para captar dichas características y permitir su aplicación. Como ejemplo práctico, y desde el punto de vista del espesor del contorno de capa, las técnicas de medición empleadas deben ser capaces de reconocer espesores de capa del orden de una décima de milímetro, espesor de capa mínimo utilizado habitualmente en la FA.

Precisamente, el presente Trabajo Fin de Grado se centrará en el reconocimiento de contornos de capa utilizando técnicas de medición basadas en la holografía conoscópica (HC) en piezas fabricadas mediante FFF. Este Trabajo se encuadra en el desarrollo de un proyecto de investigación del Plan Nacional de I+D+I titulado “Compensación en tiempo real de errores en la geometría de capa para procesos de fabricación aditiva” (Ref. DPI2017-83068-P), y financiado por el Ministerio de Economía, Industria y Competitividad.

Para alcanzar este objetivo general, se propone la consecución de los siguientes objetivos específicos:

- Conocer el funcionamiento de un sistema de holografía conoscópica integrado en una máquina de medición.
- Planificar el proceso experimental, estableciendo los factores de influencia, las áreas a digitalizar, los ensayos a realizar y el número de repeticiones, etc.
- Diseñar y fabricar mediante FA las probetas (con distintos materiales, formas y espesores de capa) que serán empleadas en las tareas de digitalizado. Incluye el diseño y construcción del utillaje (también mediante FA) para el posicionamiento y sujeción de las probetas en la máquina de medición
- Realizar los ensayos de digitalizado teniendo en cuenta los parámetros de estrategia, referencia, resolución, dirección, parámetros del sistema HC, etc. establecidos en la etapa de planificación.
- Analizar los resultados. Requiere un procesado previo de los datos recogidos en el digitalizado. Se pretenden separar los puntos digitalizados en cada capa con respecto a la inferior, con el fin de comprobar la aplicabilidad del sistema HC al reconocimiento del espesor y contorno de capas.
- Establecer las conclusiones y líneas futuras de trabajo

5.- Conclusiones

En este apartado del trabajo se expondrán una serie de conclusiones a las que se ha llegado a través del conjunto de ensayos realizados y sus correspondientes análisis. También se darán ideas acerca de posibles trabajos futuros susceptibles de ser realizados en relación con las conclusiones alcanzadas y que pueden contribuir a la apertura de nuevas investigaciones en el campo de la utilización de los sensores de holografía conoscópica.

En el presente proyecto se analizó la capacidad de la tecnología HC para el digitalizado de superficies de PLA de diferentes colores y espesores, fabricadas mediante FFF (fused filament fabrication), con el fin de poder realizar su reconstrucción y análisis geométrico. Se digitalizaron probetas de 4 colores (azul, rojo, blanco y negro) que incluían superficies circulares de 15 mm de diámetro, elevadas 1, 2, 3 y 4 capas de 0.1 mm de espesor con respecto a la superficie base de las mismas.

Inicialmente, se analizó la calidad del digitalizado por medio de tres indicadores cuantitativos: dos de ellos asociados a la calidad de la señal capturada por el sensor HC (SNR and Total) y el tercero (Proporción de Puntos), relativo a la efectividad en la captura de los puntos. A continuación, se determinó la capacidad de la tecnología HC para medir diferentes espesores de capa.

Como resultado, se puede afirmar que los mejores resultados de digitalizado fueron obtenidos para las probetas de color azul, independientemente del número de capas depositadas. Fue posible capturar el 100% de los puntos digitalizados y medir las alturas de las superficies circulares con resultados muy próximos a los nominales. En el caso de las probetas de color rojo y blanco, aunque la calidad de la señal capturada por el sensor fue baja, la reconstrucción de las superficies circulares se pudo hacer con una proporción de puntos bastante elevada. Asimismo, las alturas de los círculos presentaron discrepancias, respecto a los valores nominales, similares al color azul. Finalmente, los peores resultados se obtuvieron para las probetas de color negro, en las que la proporción de puntos capturados fue muy baja y, en consecuencia, la reconstrucción de las superficies no permitió obtener medidas de las alturas cercanas a las esperadas.

Por todo ello, se puede afirmar que la tecnología HC es válida para el digitalizado y análisis geométrico de piezas de PLA fabricadas mediante FFF, siempre que los colores empleados no absorban en exceso la luz láser.

En base a las conclusiones que se deducen de este trabajo, se pueden plantear posibles líneas de investigación futuras que podrían ser realizadas con el fin de profundizar en la investigación de la holografía conoscópica. Algunas de ellas se muestran a continuación.

- Influencia del color del spot láser en la medición de superficies de diferentes colores. Como se pudo apreciar en el apartado de análisis de resultados del TFG, en función del color de probeta utilizado los resultados de los ensayos varían significativamente, por lo que sería interesante profundizar en este campo con el objetivo de buscar un spot láser cuyas mediciones no variasen significativamente, buscando así obtener un spot independiente al color del objeto digitalizado.
- En el presente proyecto las probetas de estudio utilizadas se obtuvieron mediante FFF con PLA como material de impresión. Otra línea de investigación futura que se puede plantear es la digitalización de probetas de diferentes materiales, ya que además del color, la diferencia de material puede provocar variaciones en las mediciones, bien sea por aspectos de reflexión, porosidad, etc.
- Ligado al punto anterior, sería interesante probar diferentes configuraciones de impresión de la técnica FFF, ya que las variaciones del espesor de capa, la superposición entre ellas, o incluso las velocidades de impresión pueden producir mejoras en la calidad de las probetas y facilitar el uso de la HC para su digitalización.
- Otra línea de investigación muy interesante desde el punto de vista de la reconstrucción de superficies es la detección del borde de capa con una alta precisión, lo que se podría conseguir modificando diferentes parámetros de digitalizado y de funcionamiento del sensor.

7.- Referencias

Q. Huang, J. Zhang, A. Sabbaghi, T. Dasgupta, Optimal offline compensation of shape shrinkage for 3d printing processes, *IIE Transactions on Quality and Reliability*, 47(5), (2015) 431-441

Q. Huang, An analytical foundation for optimal compensation of three-dimensional shape deformation in additive manufacturing, *ASME Transactions, Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 138(6), (2016) 061010

K. Tong, S. Joshi, E. Lehtihet, Error compensation for fused deposition modeling (fdm) machine by correcting slice files, *Rapid Prototyping Journal*, 14(1) (2008) 4-14

K. Tong, E. Lehtihet, S. Joshi, Parametric error modeling and software error compensation for rapid prototyping, *Rapid Prototyping Journal*, 9(5) (2003) 301-313

S.K. Everton, M. Hirscha, P. Stravroulakis, R.K. Leach, A.T. Clare, Review of in-situ process monitoring and in-situ metrology for metal additive manufacturing, *Materials and Design*, 95 (2016) 431–445

S. Clijsters, T. Craeghs, S. Buls, K. Kempen, J.P. Kruth, In situ quality control of the selective laser melting process using a high-speed, real-time melt pool monitoring system, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 75(5) (2014) 1089–1101

T. Furumoto, M.R. Alkahari, T. Ueda, M.S.A. Aziz, A. Hosokawa, Monitoring of laser consolidation process of metal powder with high speed video camera, *Phys. Procedia*, 39(1) (2012) 760–766

H. Krauss, C. Eschey, M.F. Zaeh, Thermography for monitoring the selective laser melting process, *23rd International Solid Free Form Fabrication Symposium; Austin, TX*, (2012)

T. Craeghs, S. Clijsters, E. Yasa, J.-P. Kruth, Online quality control of selective laser melting, *22nd International Solid Freeform Fabrication Symposium; Austin, TX*, (2011)

E. Toyserkani, A. Khajepour, A mechatronic approach to laser powder deposition process, *Mechatronics*, 16 (2006) 631-641

Almir Heralic, Anna-Karin Christiansson, Bengt Lennartson. Height control of metal-wire deposition based on iterative learning control and 3D scanning. *Optics and lasers in engineering*, 50 (2012) 1230-1241

M. Mani, B.M. Lane, M.A. Donmez, S.C. Feng, S.P. Moylan, A review on measurement science needs for real-time control of additive manufacturing metal powder bed fusion processes, *International Journal of Production Research*, 55 (5) (2017) 1400-1418

Optimet Manual P/N 3J06009. (2019, Jan 26). OEM Manual for Optimet's Mark10 (version 1) [Online]. Available: http://www.optimet.com/register_files/Ethernet-Probe-Manual.pdf

P. Fernández, D. Blanco, C. Rico, G. Valiño y S. Mateos, «Influence of Surface Position along the Working Range of Conoscopic Holography Sensors on Dimensional Verification AISI 316 Wire EDM Machined Surfaces», *Sensors*, vol. 14, pp. 4495-4512, 2014

Álvarez, I.; Enguita, J.M.; Frade, M.; Marina, J.; Ojea, G., «On-Line Metrology with Conoscopic Holography: Beyond Triangulation», *Sensors* 2009, 9, 7021-7037

Fernández P., Blanco D., Valiño G., Hoang H., Suárez L., Mateos S., «Integration of a Conoscopic Holography Sensor on a CMM.» *Proceedings of the 4th Manufacturing Engineering Society International Conference (MESIC); Cádiz, Spain. 21–23 September 2012; pp. 225–232*