



Universidad de
Oviedo



ESCUELA POLITÉCNICA DE INGENIERÍA DE GIJÓN.

GRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA

ÁREA DE INGENIERÍA DE LOS PROCESOS DE FABRICACIÓN

ESTUDIO DE LA PRECISIÓN DIMENSIONAL Y GEOMÉTRICA DE LAS PIEZAS FABRICADAS MEDIANTE FFF EN UNA MÁQUINA DE DESARROLLO PROPIO

D. Pelayo Martínez Llano

TUTOR: D. Gonzalo Valiño Riestra

COTUTOR: D. Fernando Peña Cambón

FECHA: Junio 2021

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS.....	7
2. ESTADO DE LA TÉCNICA.....	10
2.1. EN QUÉ CONSISTE UN PROCESO DE FUSED FILAMENT FABRICATION	10
2.2. TIPO DE MÁQUINAS DE FFF SEGÚN SU ARQUITECTURA	12
2.2.1. <i>Cartesiana</i>	12
2.2.2. <i>Delta</i>	13
2.2.3. <i>Polar</i>	14
2.2.4. <i>Brazo robot</i>	15
2.2.5. <i>Core XY</i>	15
2.3. FUNDAMENTOS DE LA MEDICIÓN POR COORDENADAS MMC	16
3. METODOLOGÍA DE EXPERIMENTACIÓN.....	19
3.1. DESCRIPCIÓN GENERAL DE LOS EQUIPOS A USAR.....	19
3.1.1. <i>Impresora BCN3D Sigma</i>	19
3.1.2. <i>Banco de ensayos de IPF</i>	21
3.1.3. <i>Software Cura para la generación de G-Code</i>	25
3.1.4. <i>Descripción de la MMC de IPF</i>	27
3.1.5. <i>Software PC-Dmis</i>	30
3.2. DESCRIPCIÓN DE LA FASE 1	32
3.2.1. <i>Descripción de las probetas</i>	33
3.3. DESCRIPCIÓN DE LA FASE 2	34
3.3.1. <i>Descripción de las piezas de prueba</i>	35
4. ANÁLISIS DE DATOS	40
4.1. FASE 1.....	40
4.1.1. <i>Ensayo 1</i>	40
4.1.2. <i>Ensayo 2</i>	43
4.2. FASE 2.....	47
5. CONCLUSIONES.....	54

6. PLANIFICACIÓN Y PRESUPUESTO	56
7. REFERENCIAS	62

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1: Proceso de FFF	10
Figura 2.2: Configuración X-Y en el cabezal y Z en la mesa	12
Figura 2.3: Configuración X-Z en el cabezal e Y en la mesa	13
Figura 2.4: Configuración Z en el cabezal e X-Y en la mesa	13
Figura 2.5: Configuración Delta.....	14
Figura 2.6: Configuración polar	14
Figura 2.7: Configuración brazo robot.....	15
Figura 2.8: Configuración Core XY.....	16
Figura 2.9: Coordenadas de los puntos sobre una pieza para la verificación de la perpendicularidad entre sus caras.....	16
Figura 2.10: A) Cantilever con mesa fija. B) Cantilever con mesa móvil. C) Puente en forma de L. D) Puente móvil. E) Puente fijo. F) Tipo Gantry. G) De columna. H) De brazo horizontal con cabeza móvil. I) De brazo horizontal y mesa fija. J) De brazo horizontal con plato giratorio. K) De brazo horizontal y mesa móvil.....	17
Figura 2.11: Tipos de palpadores: a) Recto. b) Estrella. c) Punta. d) Cilíndrico. e) Disco.....	18
Figura 3.1: Impresora BCN3D Sigma.....	19
Figura 3.2: Proceso de duplicación.	20
Figura 3.3: Banco de ensayos de IPF	21
Figura 3.4: Configuración de ejes y estructura del banco de ensayos de IPF	22
Figura 3.5: Elementos de transmisión: a) Transmisión de los ejes X y U. b) Transmisión del eje Z.....	23
Figura 3.6: Elementos del puente de extrusión: a) Transmisión del eje Y. b) Cabezal de extrusión.....	24
Figura 3.7: Forma de un archivo STL	25
Figura 3.8: Interfaz del software Ultimaker Cura	26
Figura 3.9: Archivo G-Code.....	26

Figura 3.10: MMC Hexagon GLOBAL “C” Image.....	27
Figura 3.11: Elementos de la MMC	28
Figura 3.12: Cabezal indexable Renishaw PH10 MQ.....	30
Figura 3.13: Interfaz del software PC-DMIS	31
Figura 3.14: Probetas tipo Cubo y Cilindro utilizadas en la Fase 1, fabricadas en material PLA negro.....	32
Figura 3.15: Instrumentos de inspección: a) Pie de rey. b) Micrómetro. c) Microscopio USB33	
Figura 3.16: Probetas utilizadas en la Fase 1: a) Cubo. b) Cilindro.....	33
Figura 3.17: Medición de una pieza de prueba tipo cilindro hueco en una MMC.....	35
Figura 3.18: Forma geométrica de la piezas de prueba tipo cubo y designación de sus caras. 36	
Figura 3.19: Distribución de puntos para la medición por coordenadas de la pieza tipo cubo (interfaz de usuario del software de medición PC-Dmis)	36
Figura 3.20: Cotas a medir en las piezas tipo cubo	37
Figura 3.21: Distribución de puntos para la medición por coordenadas de la pieza tipo cilindro (interfaz de usuario del software de medición PC-Dmis)	38
Figura 3.22: Cotas a medir y forma geométrica del cilindro (CYL).....	39
Figura 4.1: Esquinas de los cubos del ensayo 1: a) BCN3D. b) Banco de ensayos.....	41
Figura 4.2: Superficie de los cilindros en el ensayo 1. a) BCN3D. b) Banco de ensayos	42
Figura 4.3: Esquinas de los cubos en el ensayo 2: a) BCN3D. b) Banco de ensayos	44
Figura 4.4: Errores geométricos promedio cometidos en la fabricación de las probetas prismáticas.....	51
Figura 4.5: Errores geométricos promedio cometidos en la fabricación de las probetas cilíndricas	53
Figura 6.1: Diagrama de Gantt del proyecto	58

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1: Características de los materiales de BCN3D	11
Tabla 3.1: Resolución de posicionado.....	20
Tabla 3.2 Parámetros iniciales para la fabricación de las probetas	32
Tabla 3.3: Número de puntos utilizados en las caras de las piezas tipo cubo	37
Tabla 3.4: Número de puntos utilizados en las caras de las piezas tipo cilindro	38
Tabla 4.1: Parámetros de velocidad y aceleración del ensayo 1	40
Tabla 4.2 Medidas de la distancia entre caras para los cubos en el ensayo 1	41
Tabla 4.3: Medidas de los cilindros en el ensayo 1	42
Tabla 4.4: Parámetros de velocidad y aceleración del ensayo 2	44
Tabla 4.5: Medidas de la distancia entre caras para los cubos en el ensayo 2	45
Tabla 4.6: Medidas de los cilindros en el ensayo 2.....	46
Tabla 4.7: Medidas de los cubos repetidos en el segundo ensayo 2	46
Tabla 4.8: Medidas de los cilindros repetidos en el segundo ensayo 2.....	46
Tabla 4.9: Desviaciones dimensionales y geométricas del cubo de tamaño 50 mm (PRSM_50)	47
Tabla 4.10: Desviaciones dimensionales y geométricas del cubo de tamaño 140 mm (PRSM_140).....	48
Tabla 4.11: Desviaciones geométricas de planitud de las caras de las piezas de tipo cubo.....	49
Tabla 4.12: Desviaciones geométricas de paralelismo de las caras de las piezas de tipo cubo	50
Tabla 4.13: Desviaciones geométricas de perpendicularidad de las caras de las piezas de tipo cubo	51
Tabla 4.14: Desviaciones dimensionales y geométricas de los cilindros.....	52
Tabla 6.1: Planificación del proyecto.....	56
Tabla 6.2: Fechas de la planificación	57
Tabla 6.3: Coste de los Recursos Humanos	59

Tabla 6.4: Coste del material.....	60
Tabla 6.5: Coste del software.....	60
Tabla 6.6: Coste de dispositivos.....	60
Tabla 6.7: Coste Recursos Materiales	60
Tabla 6.8: Presupuesto total del proyecto	61

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 que los procesos tradicionales de moldeo o mecanizado, la FA obtiene 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.

El sector de la FA ha experimentado un crecimiento en los últimos años, dejando de ser solamente una herramienta para la fabricación de prototipos y convirtiéndose en un sistema establecido para la obtención de piezas funcionales. Esto se debe a la rapidez de fabricación, la alta flexibilidad que permite en los modelos y el bajo coste, que han sido claves en el crecimiento de dicha técnica.

Además, se pueden fabricar piezas de distintos materiales mediante técnicas de FA, como cerámicos, composites, etc., pero las técnicas de FA más utilizadas en la industria son las de piezas metálicas y piezas de plástico, teniendo esta última gran utilidad en las fases de fabricación de prototipos para el desarrollo de productos.

Hay diversas técnicas de fabricación aditiva con un uso comercial extendido. Una de ellas es la de Fused Deposition Modelling (FDM), también conocida como Fused Filament Fabrication (FFF), que consiste en un cabezal que se desplaza en un plano y funde un filamento de plástico depositando el material capa a capa sobre una plataforma. Otra técnica es la Estereolitografía (SLA), la cual consiste en la obtención de piezas a partir de resinas líquidas fotosensibles que se curan con un haz de luz UV y posteriormente se someten a un baño químico para eliminar el exceso de material. En base a esta técnica, surge una evolución conocida como Polyjet, cuyo funcionamiento es parecido, aunque con algunas diferencias, que son: La no acumulación de resina sucia, la disminución en el tiempo de producción y la posibilidad de utilizar material soporte soluble. También está el Selective Laser Melting (SLM) que es también una técnica muy utilizada, consistente en el depósito de una capa de material en polvo 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, mencionar por su alto uso industrial, a la Inyección directa de material (DLMD), técnica que consiste en la fusión de un

material base para inyectar otro material en el baño fundido. Esta técnica se utiliza fundamentalmente para añadir detalles o estructuras sobre una pieza previamente fabricada.

El principal problema que presentan las piezas obtenidas por FA es la falta de suficiente calidad (precisión geométrica y dimensional, acabado superficial, propiedades volumétricas, errores volumétricos, etc.), estando todavía muy lejos de la obtenida en los procesos tradicionales de moldeo o mecanizado. Por ello, es necesario mejorar los resultados de calidad de los productos obtenidos mediante FA.

Una manera de resolver el problema es el uso de sistemas de control, que permiten analizar la precisión de las piezas fabricadas para poder implantar acciones de mejora. Para ello, una práctica habitual es realizar medidas sobre una pieza fabricada, analizar sus desviaciones y compararlas con el diseño original. Una vez obtenidas las conclusiones, poder implantar las correcciones que permitan fabricar la pieza correctamente.

Actualmente, los sistemas de control empleados en este tipo de células de fabricación son externos, por lo que cabe destacar lo interesante que sería integrar estos sistemas en el proceso de fabricación, pudiendo inspeccionar la pieza, analizar sus desviaciones durante su fabricación y realizar correcciones en las capas sucesivas. Esto aportaría una mejora en la precisión de la pieza y una disminución en el tiempo empleado a la hora de obtener la pieza final.

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 hace imposible poder utilizar técnicas con contacto, ya sea debido a la temperatura de la pieza en el transcurso de la impresión, al tiempo de operación necesario, y a otro gran número de factores que nos impiden tener contacto directo con la pieza.

Algunas de las técnicas de medición sin contacto utilizadas en la actualidad en la ingeniería o medicina entre otros campos, como son el digitalizado de puntos, ya sea basado en la triangulación láser, en la fotogrametría o en la holografía conoscópica, o el reconocimiento óptico, como el uso de cámaras de visión.

Todas estas técnicas mencionadas pueden ayudar a solventar el problema de precisión de las piezas obtenidas a través de FA integrándose en las propias máquinas y obteniendo así un salto de calidad durante la fabricación. Esto es posible siempre que sean capaces de apreciar las características dimensionales y geométricas, y así, poder obtener la pieza funcional.

Es importante remarcar que el Área de Ingeniería de los Procesos de Fabricación de la Universidad de Oviedo ha desarrollado una máquina (banco de ensayos) con la doble capacidad de fabricar piezas mediante FFF e inspeccionarlas mediante diferentes tipos de sensores sin contacto, dentro del 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.

La puesta en marcha de este banco de ensayos para su utilización en el proyecto de investigación requiere de un análisis del funcionamiento de cada uno de los subsistemas. Por ello, en el presente TFG se plantea como objetivo principal estudiar la precisión dimensional y geométrica que se puede obtener en la fabricación de piezas mediante tecnología FFF en el banco de ensayos desarrollado en el mencionado proyecto de investigación. Es decir, se trata de analizar el comportamiento del subsistema de impresión 3D, independientemente del subsistema de inspección, el cual será objeto de estudio en otras investigaciones.

Para el desarrollo del TFG, por tanto, se plantea la realización de las siguientes acciones específicas:

1. Diseñar diferentes piezas de prueba con formas geométricas de tipo primitivo y de diferentes tamaños.
2. Fabricar dichas piezas de prueba tanto en el banco de ensayos desarrollado como en otra impresora 3D de tipo comercial disponible en las instalaciones del Área de IPF.
3. Planificar la medición de las probetas, definiendo las características a medir y la instrumentación a utilizar.
4. Realizar las mediciones de cada pieza de prueba obtenida en cada máquina.
5. Realizar un análisis comparativo de las características medidas, que permita cuantificar las discrepancias entre el banco de ensayos y la impresora comercial.
6. Elaborar las conclusiones observadas y proponer mejoras factibles.

5. Conclusiones

En el estudio se llevó a cabo la fabricación de piezas cúbicas y cilíndricas en dos máquinas de FFF (Fused Filament Fabrication), una BCN3D y el banco de ensayos desarrollado por IPF, planificar la medición de las piezas y realizar un estudio comparativo de la precisión dimensional y geométrica de las máquinas con respecto a los valores nominales.

En primer lugar, se realizó la fase 1, en la cual, se fabricaron probetas sencillas, cubos y cilindros, pequeños para favorecer la repetibilidad del proceso y, así, unificar los parámetros de impresión de las máquinas, reajustando los parámetros de la manera más conveniente para obtener unos resultados lo más uniformes posible realizando una inspección visual (microscopio USB) y metrológica (pie de rey y micrómetro).

En segundo lugar, se realizó la fase 2, donde se fabricaron las piezas definitivas; cúbicas en dos tamaños y dos orientaciones, y cilíndricas en tres tamaños, utilizando los parámetros seleccionados en la fase 1. Se realizaron las mediciones mediante la MMC para la realización del análisis comparativo de precisión dimensional y geométrica entre las máquinas de FFF.

Aunque no se pudo llegar a una unificación clara de parámetros debido a algunos obstáculos acontecidos a lo largo del estudio, se utilizaron los parámetros mostrados del ensayo 2 de la fase 1 como válidos para obtener una idea aproximada en la fase 2. Por otro lado, la fase 2 sí que se pudo completar como se indicaba en los objetivos iniciales y, en consecuencia, obtener unos resultados de las piezas finales para su análisis.

Los resultados obtenidos permiten afirmar que la BCN3D obtuvo unos resultados más cercanos a los valores nominales dimensional y geométricamente que el banco de ensayos tanto en las piezas cúbicas como en las cilíndricas. Además, se pudo detectar un error de escala en el banco de ensayos obteniendo las piezas fabricadas en este con dimensiones inferiores a las del valor nominal a medida que aumentan de tamaño. Por otro lado, el banco de ensayos, pese a tener un mejor ajuste de cuadratura, esto no es suficiente para acercarse a los resultados obtenidos en la BCN3D.

A partir de las conclusiones obtenidas en el estudio, se pueden plantear las siguientes líneas de trabajo posibles para dar continuidad a la investigación con el fin de mejorar la precisión del banco de ensayos:

- Realizar algunos ajustes en el banco de ensayos relativos a la relación de transmisión de cada eje (especialmente el Z) para la mejora de la precisión dimensional.
- Ajustar mejor los parámetros de impresión para reducir el efecto de protuberancias en las esquinas y bordes.
- Los errores obtenidos en el banco de ensayos y comparados con la BCN3D permitirán desarrollar un sistema de compensación de errores geométricos a un doble nivel: una compensación en el modelo STL de la pieza, antes de laminarla en el software utilizado (Cura Ultimaker); una compensación en bucle cerrado, analizando cada capa depositada utilizando el sistema de inspección sin contacto incorporado en el banco de ensayos.
- Dotar al banco de ensayos de un sistema de mamparas que permitan cerrar la zona de impresión para conservar mejor el calor del proceso en la mesa de construcción de las piezas, evitando así contracciones provocadas por diferencias en el tiempo de enfriamiento de distintas zonas de la pieza que, finalmente, son causas importantes de distorsiones geométricas.

7. Referencias

LIBROS Y ARTÍCULOS:

- [1] P. Minetola, F. Calignano, M. Galati (2020). Comparing geometric tolerance capabilities of additive manufacturing systems for polymers. *Additive Manufacturing* 32: 101103.
- [2] P. Minetola, L. Iuliano, G. Marchiandi (2016). Benchmarking of FDM machines through part quality using IT grades. *48th CIRP Conference on MANUFACTURING SYSTEMS - CIRP CMS 41*: 1027-1032.
- [3] Chun-Ying Lee, Chung-Yin Liu (2019). The influence of forced-air cooling on a 3D printed PLA part manufactured by fused filament fabrication. *Additive Manufacturing* 25: 196-203.
- [4] H. Budinoff, S. McMains (2018). Prediction and visualization of achievable orientation tolerances for additive manufacturing. *15th CIRP Conference on Computer Aided Tolerancing – CIRP CAT 75*: 81-86.
- [5] C. Fernández (2020). Desarrollo de una plataforma experimental para la fabricación aditiva de piezas y su verificación en máquina. Trabajo de Fin de Máster de Ingeniería Mecatrónica. Universidad de Oviedo, Escuela Politécnica de Ingeniería de Gijón.
- [6] J. A. Fandiño (2008) Estudio de las estrategias más adecuadas para el digitalizado sin contacto de piezas, en función de sus características geométricas, utilizando máquinas de medir por coordenadas con tecnología láser. Proyecto de final de carrera de Ingeniería Industrial. Universidad de Oviedo, Escuela Politécnica de Ingeniería de Gijón.
- [7] Y. Fernández (2019). Digitalizado de componentes obtenidos por fabricación aditiva mediante técnicas de holografía conoscópica. Trabajo de fin de grado de Ingeniería Mecánica. Universidad de Oviedo, Escuela Politécnica de Ingeniería de Gijón.

PÁGINAS WEB:

- [8] <https://www.gipuzkoa.eus/documents/20933/1883176/DFG-Industria4-0-Caso-Fabricacion-Aditiva-IMH-Esp.pdf> (último acceso 15/04/21).

- [9] <https://www.luisllamas.es/como-funciona-la-cinematica-de-una-impresora-3d-fff/> (último acceso 15/04/21).
- [10] <https://www.bcn3d.com/es/bcn3d-filamentos/> (último acceso 15/04/21).
- [11] <https://www.3dnatives.com/es/tipos-impresoras-3d-fdm-190620172/> (último acceso 16/04/21)
- [12] <https://www.3dnatives.com/es/creadores-impresora-3d-de-6-ejes-160320172/> (último acceso 16/04/21).
- [13] <https://tublogen3d.com/impresoras-3d/core-xy-guia/> (último acceso 17/04/21).
- [14] <https://www.keyence.com.mx/ss/products/measure-sys/gd-and-t/measure/instrument.jsp> (último acceso 17/04/21).
- [15] <https://metrologiadimensionalcom.wordpress.com/2018/02/15/maquinas-de-medicion-por-coordenadas-mmc/> (último acceso 17/04/21).
- [16] <https://www.bcn3d.com/es/bcn3d-sigma-d25/> (último acceso 19/04/21).
- [17] <https://www.luisllamas.es/que-es-el-g-code-y-su-importancia-en-la-impresion-3d/> (último acceso 20/04/21).
- [18] <https://www.impresion3daily.es/que-es-un-archivo-stl/> (último acceso 20/04/21).
- [19] [https://www.interempresas.net/Medicion/Articulos/102185-Estudio-acerca-de-la-tipologia-de-las-maquinas-medidoras-por-coordenadas-\(MMC\).html](https://www.interempresas.net/Medicion/Articulos/102185-Estudio-acerca-de-la-tipologia-de-las-maquinas-medidoras-por-coordenadas-(MMC).html) (último acceso 25/04/21).
- [20] <https://www.renishaw.es/es/en-primera-linea-guia-para-la-seleccion-del-palpador-de-una-mmc--10927> (último acceso 05/06/2021)
- [21] <https://www.renishaw.es/es/tipos-de-palpadores--6627> (último acceso 05/06/2021)
- [22] <https://www.bcn3d.com/es/producto/hotend-by-e3d/> (último acceso 05/06/2021)
- [23] <https://www.interempresas.net/ObrasPublicas/FeriaVirtual/Producto-Sistema-programacion-metrologia-arquitectura-abierta-Hexagon-Metrology-PC-DMIS-EMS-153102.html> (último acceso 07/06/2021)