

Determinación de la influencia en las características dimensionales de las piezas fabricadas en impresoras 3D de temperatura, velocidad de impresión y altura de capa durante la fabricación

Alberto Mínguez-Martínez¹, Fernando Ramos-González¹, Gonzalo Quirós-Torres¹, Jesús de Vicente y Oliva¹

¹ Laboratorio de Metrología y Metrotecnica, Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales, Universidad Politécnica de Madrid, España. Email: a.minguezm@upm.es

Resumen

Las tecnologías de manufactura aditiva, entre las que se encuentra la impresión 3D, es uno de los pilares fundamentales de la industria 4.0, ya que permite obtener prototipos y piezas fabricadas de una manera rápida, versátil y económica. El resultado del proceso de impresión 3D se ve afectado por los efectos que tienen los diferentes parámetros del proceso sobre materiales como el PLA, que es el más utilizado. En este artículo se estudiará el efecto que tienen la altura de capa, la velocidad y la temperatura de impresión sobre las piezas fabricadas con impresión 3D haciendo un estudio dimensional con un proyector de perfiles. Se ha determinado que, de entre los tres parámetros, la temperatura de extrusión es el que mayor efecto tiene.

Palabras clave: impresión 3D, parametrización, fabricación aditiva, metrología dimensional.

Abstract

Additive manufacturing technologies, among which is 3D printing, is one of the fundamental pillars of Industry 4.0, since it allows to obtain prototypes and manufactured parts in a fast, versatile, and economical way. The result of the 3D printing process is affected by the effects that the different parameters of the process have on materials such as PLA, which is the most widely used. In this article, the effect of layer height, speed and printing temperature on parts manufactured with 3D printing will be studied, making a dimensional study with a profile projector. It has been determined that, among the three parameters, the extrusion temperature has the greatest effect.

Keywords: 3D printing, parameterization, additive manufacturing, dimensional metrology.

1. Introducción

La Cuarta Revolución Industrial, también conocida como industria 4.0, está cambiando la forma en que los negocios operan y, por lo tanto, los entornos en los que se ven obligados a competir [1]. El término "Industria 4.0" fue introducido en 2011 en la Feria de Hannover y se transformó inmediatamente en el foco de atención tanto del Gobierno Alemán como de otros países europeos [2]. La Industria 4.0 se interpreta como la aplicación de los sistemas ciber-físicos a las cadenas de

producción industrial, extendiéndose mucho más allá de los límites del Internet de las Cosas, que es típicamente donde comienzan y terminan muchos acercamientos al fenómeno [1, 2]. El principal potencial económico de la Industria 4.0 es su capacidad para acelerar la toma de decisiones corporativas y los procesos de adaptación. Esto se aplica tanto a los procesos para impulsar la eficiencia en ingeniería, fabricación, servicios y ventas y marketing como al enfoque de unidades de negocio enteras o cambios en el modelo de negocio [2].

La Industria 4.0 materializa la promesa de una nueva revolución industrial. En ella se tendrán unas técnicas avanzadas de producción y operaciones que usen tecnologías digitales inteligentes. Con ellas se podrá crear una empresa digital que, no solo estaría interconectada y sería autónoma, sino que también podría comunicarse, analizar y usar datos para impulsar más acciones inteligentes en el mundo físico. La Industria 4.0 representa las formas en que la tecnología inteligente y conectada se integrará en las distintas organizaciones, las personas, y activos; y está marcada por la aparición de capacidades como la robótica, el análisis, la inteligencia artificial y las tecnologías cognitivas, la nanotecnología, la computación cuántica, los dispositivos portátiles, el Internet de las cosas, materiales avanzados y la fabricación aditiva [1]. Las tendencias tecnológicas más relevantes desde el punto de vista de la industria 4.0 [2]:

- Internet de los Servicios (*Internet of Services*, IoS).
- Internet de las Personas (*Internet of People*, IoP).
- Internet de los Datos (*Internet of Data*, IoD).
- Trabajo en la Nube (*Cloud Computing*).
- *Blockchain*.
- Realidad Aumentada (*Augmented reality*, AR).
- Automatización y robótica industrial.
- Ciberseguridad.
- Simulación y técnicas de modelado.
- Fabricación aditiva (*Additive manufacturing*, AM).

De entre todas ellas, nos centraremos en la Fabricación Aditiva (AM). Se trata de una tecnología de fabricación que consiste, básicamente, en la manipulación de un material a escala micrométrica, de manera que se funda y pueda ser depositado de forma gradual y muy precisa, generando capa a capa un sólido con la geometría deseada [2, 3, 4]. Esta tecnología, en general, y la impresión 3D, en particular, permiten a los fabricantes obtener prototipos y diseños de pruebas de concepto, lo que simplifica y agiliza el proceso de diseño y fabricación de nuevos productos [2, 5]. Aunque novedosas, son muy diversas las tecnologías que permiten fabricar piezas por este principio, y se espera que supongan una nueva revolución industrial. La principal ventaja que presenta este tipo de tecnología es que se puede reproducir cualquier geometría que se pueda necesitar, por compleja que sea, sin necesidad de utillajes ni procesos de fabricación complejos [3]. Por tanto, las principales características que distinguen el proceso de fabricación de sólidos por adición de capas de material (AM) de cualquier otro proceso de fabricación industrial, y que le confieren enormes

ventajas competitivas, son las siguientes: complejidad geométrica y personalización del proceso de diseño.

Si nos centramos en la complejidad geométrica, características funcionales que los diseños de las piezas presentan a menudo, tales como los canales internos, la esbeltez, vaciados interiores, formas irregulares, espesores variables, ergonomía, hidrodinámica, aerodinámica, etc. la reproducción de geometrías que se dan en la natura son retos con los que tienen que lidiar los métodos convencionales de fabricación de piezas (ya sean procesos de conformado o procesos sustractivos). A menudo, la manera de resolver estos problemas ha sido a través de soldaduras, ensamblajes, aproximaciones u otros procesos que elevan el coste de las piezas. Sin embargo, a través de las tecnologías AM se podría llegar a conseguir estas características con un coste razonable.

En cuanto a la personalización del proceso de diseño, es importante destacar que, inmediatamente después de obtener el diseño, las piezas se pueden imprimir directamente, sin necesitar casi ninguna preparación o interacción humana. Cuando hay que realizar cambios o ajustes en el diseño, estos son efectivos al momento. Utilizando los procesos de fabricación tradicionales, los cambios y ajustes en el diseño a menudo requieren largos y costosos cambios en el proceso de producción, como por ejemplo nuevos moldes, diferentes quemadores, la adquisición de un equipo diferente, etc. Con la fabricación aditiva, aun siendo radical el cambio en el diseño de una pieza, el efecto en el modo de producción será prácticamente nulo y, por tanto, el impacto en el tiempo de fabricación y en el coste de la pieza será mínimo. Mediante las tecnologías aditivas (AM) se obtiene la geometría añadiendo material a partir de geometría virtual, sin uso de preformas (técnicas por conformado) y sin sustraer material (técnicas sustractivas), tal como se indica en la Figura 1 [3].



Figura 1. Concepto de fabricación sustractiva comparada con AM [3].

Como se ha expuesto, la AM permite diseñar los diferentes componentes con menos restricciones que con los procesos de fabricación tradicionales y proporciona una capacidad productiva muy superior, lo cual permite grandes mejoras en tiempo de producción y flexibilidad y reducción de costes. Sin embargo, aunque supone un cambio y un avance importante, los métodos de fabricación tradicionales no pueden ser sustituidos debido a las desventajas que presentan las tecnologías de AM [4]:

- Restricciones de tamaño.
- Tiempo de producción.
- Coste.
- Problemas de regulación.
- Limitada resistencia mecánica.
- Dificultad de control de la precisión en la fabricación.
- Calidad superficial de las piezas.

Por otro lado, es importante destacar que la Industria 4.0 busca producir lotes pequeños de productos con un alto grado de personalización. Para asegurar la calidad de los productos, los nuevos requerimientos de los procesos de fabricación y las nuevas necesidades de la industria hace que sea necesario conseguir patrones dimensionales trazables a la referencia (es decir, al metro) para casi cada aplicación [6]. En la industria de producción, los laboratorios de Metrología Dimensional son los responsables de verificar la calidad dimensional de los productos, es decir, que se cumplan los requerimientos dimensionales y de acabado superficial [7]. Antes de continuar, es necesario definir algunos conceptos metroológicos importantes. Para ello se utilizará el Vocabulario Internacional de Metrología (VIM) [8]:

- *Medición* (VIM 2.1 [8]): proceso que consiste en obtener experimentalmente uno o varios valores que pueden atribuirse razonablemente a una magnitud.
- *Resultado de medida* (VIM 2.8 [8]): conjunto de valores de una magnitud atribuidos a un mensurando, acompañados de cualquier otra información relevante disponible, como la incertidumbre de medida.
- *Incertidumbre de medida* (VIM 2.26 [8]): parámetro no negativo que caracteriza la dispersión de los valores atribuidos a un mensurando. Para ello, habitualmente se utilizan patrones de medida.
- *Patrón de medida* (VIM 5.1 [8]): realización de la definición de una magnitud dada, con un valor determinado y una incertidumbre de medida asociada, tomada como referencia.
- *Calibración* (VIM 2.39 [8]): operación que, en unas condiciones especificadas, establece una relación entre los valores de una medición y sus incertidumbres de medida.
- *Trazabilidad* (VIM 2.41 [8]): propiedad de un resultado de medida por la cual el resultado puede relacionarse con una referencia mediante una cadena ininterrumpida y documentada de calibraciones, cada una de las cuales contribuye a la incertidumbre de medida.

De esta manera, el objetivo que se persigue con este trabajo es poder determinar en qué condiciones de fabricación se debe trabajar con la impresión 3D para obtener patrones de medida que proporcionen los mejores resultados desde el punto de vista dimensional. Como se establece con [9], las propiedades mecánicas de las piezas fabricadas mediante impresión 3D se ven afectadas por los parámetros de impresión. En este estudio se va a estudiar el efecto que tienen sobre la estabilidad dimensional los siguientes parámetros de proceso:

- Temperatura de impresión.
- Velocidad de extrusión del filamento.
- Altura de capa

2. Materiales y Métodos

En esta sección se va a detallar los materiales utilizados para este estudio.

2.1. Fabricación de la Pieza Patrón

2.1.1. Modelo de patrón

El modelo que se va a utilizar es el siguiente:

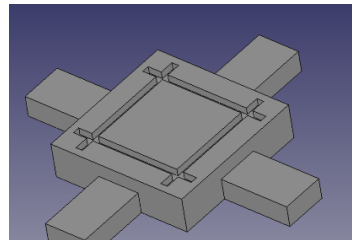


Figura 2. Modelo del patrón de estudio

Una de las técnicas más utilizadas para la calibración de instrumentos de medida que funcionen mediante amplificación óptica y para la calibración de objetos y patrones con este tipo de instrumentos de medida es la determinación de la distancia entre puntos. En el caso de este estudio, el diseño del patrón está basado en una regla patrón de trazos, que es uno de los patrones de referencia más utilizados en la calibración de instrumentos de medida por amplificación óptica [10]. Con estos instrumentos de medida, es necesario realizar siempre el mismo enrase y, por ello, hay que tener en cuenta la anchura del trazo. Por ello, se podría decir que existen tres técnicas de medida para la estimación de la distancia entre dos puntos:

- Enrasar al principio del trazo (dejando el trazo a la derecha).
- Enrasar al final del trazo (dejando el trazo a la izquierda).
- Enrasar al principio y al final del trazo y calcular la posición de la línea media del mismo.

El diseño tiene las siguientes características:

- Una base cuadrada de 20 mm de lado. El tamaño del diseño está pensado para que se minimicen los errores que puedan haber en las escalas de la impresora 3D
- Surcos de 3 mm de ancho que servirán a modo de trazo para tener referencia de las medidas.
- Unos salientes para poder amarrar la pieza a la hora de medir.

Inicialmente, el modelo solamente iba a tener cuatro crucetas de 1 mm de ancho en las esquinas para poder realizar las medidas. Como el tamaño resultó muy pequeño, se decidió cambiar el modelo y añadir los surcos entre las cruces para facilitar el proceso de medida. Además, este diseño permitió tomar más datos y, así, obtener una muestra más representativa estadísticamente.

2.1.2. Software

El software utilizado para el diseño de los patrones es FreeCAD 0.19, una aplicación de libre acceso que permite el modelado paramétrico 3D. Se escogió este software puesto que nos permite modelar objetos 3D con precisión y control sobre el historial de modelado y es de libre acceso, lo que permite que otras personas puedan reproducir este experimento con las mismas condiciones.

Para el proceso de división en capas y el trazado de la ruta de impresión de las piezas se utilizó el software Ultimaker Cura 4.12.1, ya que es compatible con todas las impresoras 3D y que acepta formatos como STL, OBJ, X3D y 3MF. Además, este software de medida es también de libre acceso.

2.2. Proceso de impresión

2.2.1. Impresora 3D

El filamento que se utilizará en los experimentos será el polímero termoplástico ácido poliláctico (PLA). De acuerdo con Serna et al. en su artículo [11], su molécula precursora es el ácido láctico. Debido a su biodegradabilidad, propiedades de barrera y biocompatibilidad, este biopolímero ha encontrado numerosas aplicaciones ya que presenta un amplio rango inusual de propiedades, desde el estado amorfo hasta el estado cristalino; propiedades que pueden lograrse manipulando las mezclas entre los isómeros D (-) y L(+), los pesos moleculares, y la copolimerización. Las piezas se fabricarán en una impresora 3D Anycubic i3 Mega (Figura 3). Se trata de una impresora comercial, con un marco metálico, capaz de producir impresiones con una resolución de capa de hasta 0,04 mm.



Figura 3. Impresora 3D ANYCUBIC i3 MEGA

2.2.2. Diseño del experimento

Como se establece en la Introducción, en este trabajo se va a estudiar la variación dimensional que se obtiene al variar a lo largo de todo su rango la temperatura de impresión, la velocidad de extrusión y la altura de capa. Los valores límite y el valor en el que se fija cada parámetro de cada uno de éstos están recogidos en la Tabla 1.

Tabla 1. Valores mínimos y máximos de los parámetros de impresión.

Valores mínimos y máximos de los parámetros de impresión.			
Parámetro	Valor Mínimo	Valor Máximo	Valor medio
Temperatura de impresión (°C)	180	220	200
Velocidad de extrusión (mm/s)	20	80	50
Altura de capa (mm)	0,04	0,32	0,15

El efecto de cada parámetro se va a evaluar mediante cinco puntos de estudio. Para determinar los parámetros de impresión de cada punto de estudio para evaluar cómo afecta cada parámetro, se fijan dos de los parámetros en un valor de referencia (entorno a la mitad del rango) y se varía el parámetro que se quiere estudiar. Los valores de los parámetros a los que se realiza cada impresión, así como el tiempo de impresión estimado por el Ultimaker Cura 4.12.1, están recogidos en la Tabla 2.

Tabla 2. Parámetros de impresión.

Valores mínimos y máximos de los parámetros de impresión.				
#	Temp. (°C)	Velocidad (mm/s)	Altura (mm)	Tiempo (min)
1	180	50	0,15	24
2	190	50	0,15	24
3	200	50	0,15	24
4	210	50	0,15	24
5	220	50	0,15	24
6	200	50	0,04	92
7	200	50	0,10	37
8	200	50	0,20	18
9	200	50	0,32	12
10	200	20	0,15	55
11	200	35	0,15	33
12	200	65	0,15	20
13	200	80	0,15	18

2.3. Medición

2.3.1. Proyector de perfiles

De acuerdo con el Procedimiento DI-001 para la calibración de Proyectores de Perfiles redactado por el Centro Español de Metrología (CEM) [10], un proyector de perfiles es un instrumento de medida de dimensiones y formas, por amplificación óptica que permite realizar medidas directas o con desplazamiento sobre una pantalla de proyección. Se trata de un equipo medidor muy extendido en los departamentos de calidad.

En este caso, se utilizará proyector de perfiles de eje horizontal de la marca NIKON, modelo H14B y con número de serie 10129 (véase Figura 4). Este proyector de perfiles permite la iluminación de las muestras tanto de forma diascópica (por luz transmitida) como episcópica (por luz reflejada) Los campos de medida del proyector son $C_x = 200$ mm, $C_z = 100$ mm y $\alpha = 360^\circ$ y sus resoluciones son $E_x=E_z = 0.001$ mm tomadas mediante un display digital y $E_\alpha = 1'$ tomado de manera analógica. Para este experimento se utilizará un objetivo con amplificación 100X.

De acuerdo con la CMC, es decir, la “Capacidad de Medida y Calibración” del Laboratorio de Metrología y Metrotecnica (LMM) de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales (ETSII) de la Universidad Politécnica de Madrid (UPM), acreditada por ENAC (la Entidad Nacional de Acreditación) según la ISO 17025, que se puede consultar en la web de ENAC [12], para la medida de piezas en general con proyectores de perfiles hay que tener en cuenta la incertidumbre típica que se calcula con la ecuación (1):

$$u = (1,25 + 1,25 \cdot L) \mu m \quad (1)$$

Con L expresado en metros.



Figura 4 Proyector de perfiles utilizado

2.3.2. Procedimiento de medida

La medida se realizará de manera unidimensional, es decir, solo se tomarán medidas en el eje X del proyector de perfiles. De las tres técnicas de medida que se ha explicado anteriormente, se va a estimar la posición de la línea medida de cada surco. Para ello, se va a tratar de determinar la distancia entre las líneas medias de los surcos que están en posición vertical. Se tomarán medidas a cinco alturas diferentes de acuerdo con el esquema de medida de la Figura 5:

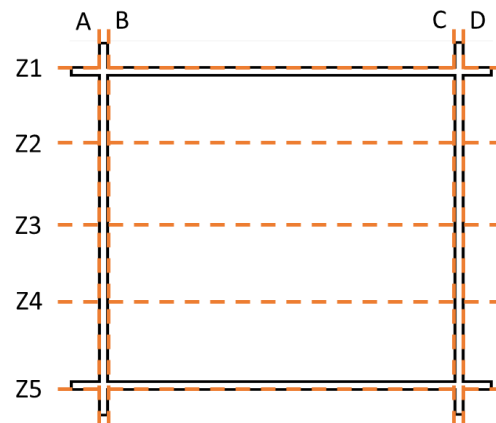


Figura 5 Esquema de medida

Las distancias nominales del modelo están recogidas en la Tabla 3.

Tabla 3. Distancias nominales de los puntos de medida.

Distancias nominales de los puntos de medida	
Referencias	Distancias (mm)
A - B	1
A - C	13
A - D	14
A - Z2	4
A - Z3	6,5
A - Z4	9
A - Z5	14

Una vez determinadas las distancias con el proyector de perfiles, se gira la pieza y se vuelve a medir de acuerdo con el mismo esquema. Se tomarán las medidas con giros de 90°, 180° y 270°. De esta manera se determinarán las distancias entre las ranuras tanto horizontales y verticales de la pieza.

El cálculo de las incertidumbres de medida se llevará a cabo de acuerdo con los principios establecidos en la Guía para la expresión de la Incertidumbre de medida GUM [13] y el documento EA-4/02 M 2013 [14].

3. Resultados

En este apartado se presentan los resultados para cada uno de los experimentos. Todas las medidas de las distintas tablas y figuras están expresadas en mm.

Los cálculos se realizan teniendo en cuenta que:

- Distancia nominal entre los surcos (x): 13 mm.
- Incertidumbre típica ($u(x)$) de la medida con el proyector de perfiles, calculada con la ecuación (1): 0,018 mm.
- Para el cálculo de las incertidumbres expandidas ($U(x)$) se utiliza un factor de cobertura $k = 2$ que es el que asegura una probabilidad de cobertura de aproximadamente el 95%.

Utilizando el proyector de perfiles, se va a tratar de determinar la distancia x entre los trazos. Para ello, se va a determinar el promedio de las medidas que se determinen entre los surcos horizontales y verticales. La incertidumbres de las medidas se calcularán de acuerdo con la ecuación (2):

$$U(x) = k \cdot \sqrt{\frac{s^2(x)}{5} + u_{PROY}^2 + \frac{e^2}{12}} \quad (1)$$

Donde $s(x)$ es la desviación típica de las medidas, u_{PROY} es la incertidumbre que aporta el proyector de perfiles y e es la división de escala del proyector de perfiles.

3.1. Temperatura de extrusión

Los resultados obtenidos están recogidos en la Tabla 4 (expresados en mm) y representados en la Figura 6:

Tabla 4. Promedios, desviaciones típicas, diferencias entre los ejes, incertidumbres típicas e incertidumbres expandidas para cada punto de estudio.

Efecto de la temperatura					
Temp. (°C)	180	190	200	210	220
Prom.	12,912	12,908	12,905	12,897	12,913
X-Y	0,074	0,043	0,041	-0,028	-0,016
s	0,052	0,031	0,029	0,020	0,011
u	0,029	0,022	0,022	0,020	0,018
U	0,058	0,044	0,044	0,039	0,036

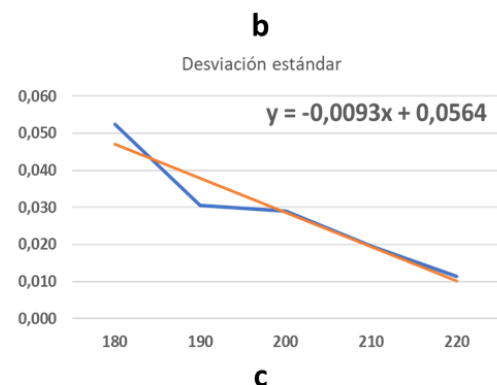
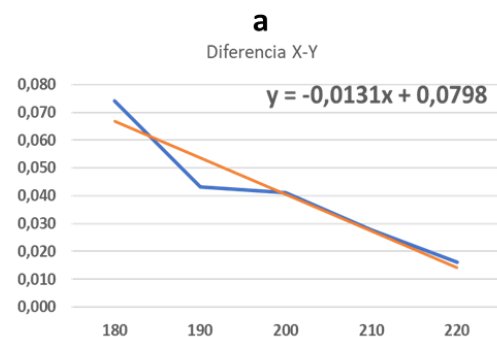
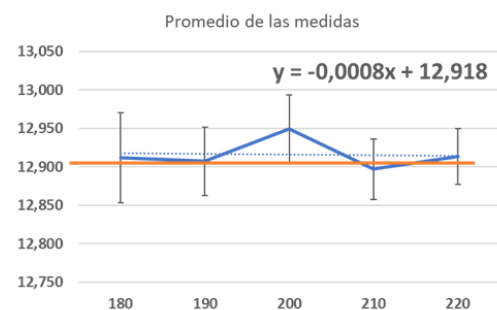


Figura 6. Evolución con el aumento de la temperatura de extrusión de: a. Promedio de las medidas con las incertidumbres de medida; b. Diferencia X-Y; c. Desviación típica

3.2. Velocidad de impresión

Los resultados obtenidos están recogidos en la Tabla 5 y representados en la Figura 7:

Tabla 5. Promedios, desviaciones típicas, diferencias entre los ejes, incertidumbres típicas e incertidumbres expandidas para cada punto de estudio.

Efecto de la velocidad					
Temp. (°C)	20	35	50	65	80
Prom.	12,903	12,867	12,950	12,917	12,913
X-Y	-0,027	0,022	0,041	0,034	-0,024
s	0,019	0,016	0,029	0,024	0,017
u	0,019	0,019	0,022	0,020	0,019
U	0,039	0,038	0,044	0,041	0,038

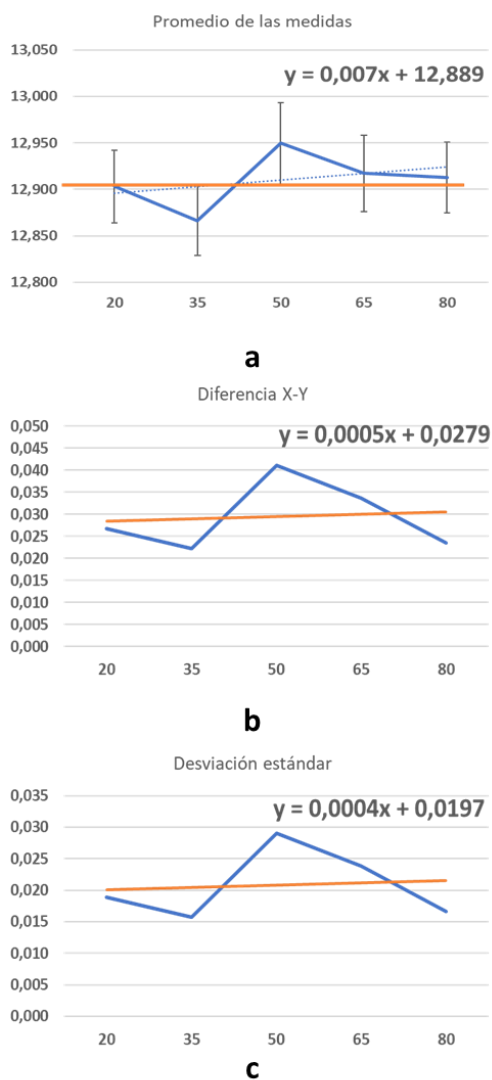


Figura 7 Evolución con el aumento de la velocidad de proceso de: a. Promedio de las medidas con las incertidumbres de medida; b. Diferencia X-Y; c. Desviación típica

3.3. Altura de capa

Los resultados obtenidos están recogidos en la Tabla 6 y representados en la Figura 8:

Tabla 6. Promedios, desviaciones típicas, diferencias entre los ejes, incertidumbres típicas e incertidumbres expandidas para cada punto de estudio.

Efecto de la altura de capa					
Temp. (°C)	0,04	0,10	0,15	0,20	0,32
Prom.	12,922	12,905	12,950	12,970	12,945
X-Y	-0,039	0,032	0,041	-0,061	0,052
s	0,028	0,022	0,029	0,043	0,037
u	0,021	0,020	0,022	0,026	0,024
U	0,043	0,040	0,044	0,052	0,048

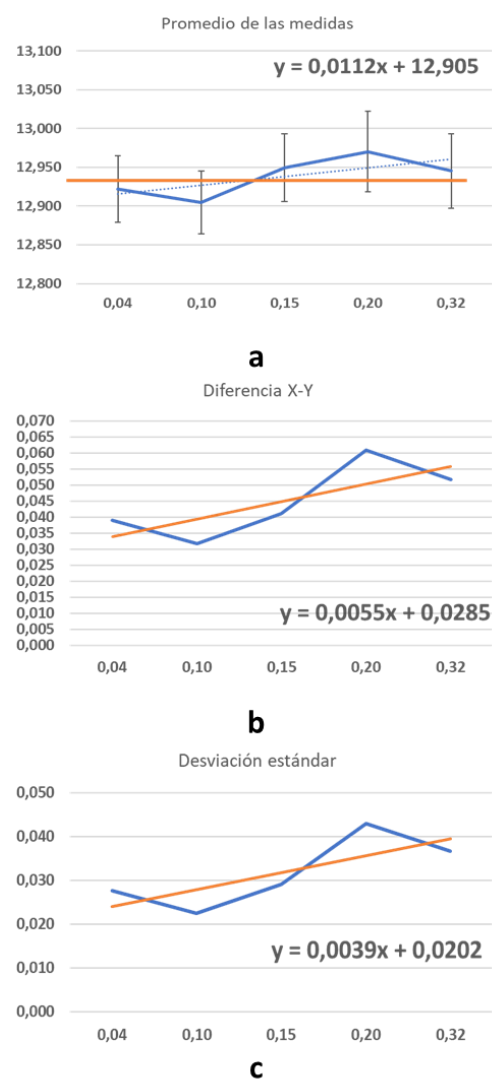


Figura 8. Evolución con el aumento de la altura de capa de: a. Promedio de las medidas con las incertidumbres de medida; b. Diferencia X-Y; c. Desviación típica

4. Conclusiones

A partir de los datos obtenidos durante el presente estudio se puede ver que:

- El parámetro que mayor influencia tiene parece ser la temperatura de extrusión.
- Existe una diferencia en los errores que comete la impresora entre el eje X y el Y.
- La impresora 3D necesita correcciones tanto en el eje X como en el eje Y, siendo más necesarias en este último.

En cuanto al estudio de los parámetros, parece que la velocidad de impresión y la altura de capa no tienen unos efectos claros. Sin embargo, en cuanto a la temperatura:

- A mayor temperatura, menor desviación típica. En este caso, la desviación típica s medirá la reproducibilidad de la impresora, es decir, la capacidad de producir piezas con las mismas dimensiones (sean las que sean, cercanas o no a los nominales prescritos). A la luz de los resultados, con temperaturas bajas, puede haber variaciones de hasta $4*s=0,2$ mm entre dos piezas fabricadas una detrás de la otra y eso para una dimensión de 13 mm. Sin embargo, para temperaturas altas el efecto anterior parece reducirse a $4*s=0,044$ mm, es decir, la quinta parte.
- A mayor temperatura, hay menos diferencias entre las dimensiones en X y en Y de la pieza: se pasa de unos 0,08 mm a solo 0,02 mm. El error queda dividido por cuatro.

Por tanto, solo la temperatura parece afectar. Y los resultados son mejores cuanto más alta es la temperatura:

- Menores diferencias entre las dimensiones de la pieza en X y en Y.
- Mejor reproducibilidad (las piezas fabricadas tienen unas dimensiones más próximas entre sí).

5. Referencias

[1] M. Cottelleer y B. Sniderman, «Deloitte Insights - Forces of change: Industry 4.0,» 2017. [En línea]. Disponible online en : <https://www2.deloitte.com/content/dam/Deloitte/es/Documents/manufacturing/Deloitte-ES-manufacturing-industria-4.0.pdf>. [Último acceso: 09 07 2022].

[2] M. Ghobakhloo, «The future of manufacturing industry: a strategic roadmap toward Industry 4.0,» *Journal of Manufacturing Technology Management*, vol. 29, n° 6, pp. 910-936, 2018.

[3] M. Zahera, «La fabricación aditiva, tecnología avanzada para el diseño y desarrollo de productos,» de *XVI Congreso Internacional de Ingeniería de Proyectos*, Valencia, 2012.

[4] M. Attaran, «The rise of 3-D printing: The advantages of additive manufacturing over traditional manufacturing,» *Business Horizons*, vol. 60, pp. 677-688, 2017.

[5] S. Subramaniam, M. Samykano, S. Selvamani, W. Ngui, K. Kadigama, K. Sudhakar y M. Idris, «3D Printing: Overview of PLA Progress,» *AIP Conference Proceedings*, vol. 2059, n° 020015, 2019.

[6] A. Mínguez Martínez, C. Gómez Pérez, D. Canteli Pérez-Caballero, L. Carcedo Cerezo y J. de Vicente y Olvica, «Design of Industrial Standards for the Calibration of Optical Microscopes,» *Materials*, vol. 14 (1), n° 29, 2021.

[7] H. D. VORA y S. SANYAL, «A comprehensive review: metrology in additive manufacturing and 3D printing technology,» *Progress in additive manufacturing*, vol. 5, n° 4, pp. 319-353, 2020.

[8] Joint Committee for Guides in Metrology (JCGM), *International Vocabulary of Metrology (VIM)*, 3 ed., Paris: JCGM Publications, 2012.

[9] J. Fernandes, A. Deus, L. Reis, M. Vaz y M. Leite, «Study of the influence of 3D printing parameters on the mechanical properties of PLA,» de *Proc. Of the 3rd Intl. Conf. on Progress in Additive Manufacturing (Pro-AM 2018)*, Singapore, 2018.

[10] Centro Español de Metrología (CEM), *Procedimiento DI-001 para la Calibración de Proyector de Perfiles*, Madrid: Publicaciones del Ministerio de Industria y Energía y del Ministerio de Fomento.

[11] L. Serna, A. Rodríguez y F. Albán, «Ácido Poliláctico (PLA): Propiedades y Aplicaciones,» *Ingeniería y Competitividad*, vol. 5, n° 1, pp. 16-26, 2003.

[12] Entidad Nacional de Acreditación, «Alcance de acreditación 3/LC10.002 - Calibraciones (Laboratorios de calibración),» 26 02 2021. [En línea]. Disponible online en: <https://www.enac.es/documents/7020/6bc00c48-8bce-428c-9928-16a93a5c4340>. [Último acceso: 09 07 2022].

[13] Joint Committee for Guides in Metrology, Working Group 1 (JCGM/WG1), *JCGM 100:2008 Evaluation of measurement data - Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM)*, Paris: JCGM Publications, 2008.

[14] European Accreditation (EA), *EA-4/02 M 2013 - Evaluation of the Uncertainty of Measurement in Calibration*, EA Publications, 2013.