

Propuesta de plantilla integrada por geometrías para la determinación de la capacidad de proceso de impresión por la tecnología de Fabricación por Filamento Fundido

Izbel Campos Pérez ^a, Julian I. Aguilar-Duque ^b, Guillermo Amaya-Parra ^c, Victor M. Juárez-Luna ^d.

^a Universidad Autónoma de Baja California, Facultad de Ingeniería Arquitectura y Diseño, Carretera Transpeninsular Ensenada-Tijuana Número 3917, Colonia Playitas. izbel.campos.perez@uabc.edu.mx Ensenada, B.C., México C.P. 22860.

^b Universidad Autónoma de Baja California, Facultad de Ingeniería Arquitectura y Diseño, Carretera Transpeninsular Ensenada-Tijuana Número 3917, Colonia Playitas. julian.aguilar@uabc.edu.mx Ensenada, B.C., México C.P. 22860.

^c Universidad Autónoma de Baja California, Facultad de Ingeniería Arquitectura y Diseño, Carretera Transpeninsular Ensenada-Tijuana Número 3917, Colonia Playitas. amaya@uabc.edu.mx Ensenada, B.C., México C.P. 22860.

^d Universidad Autónoma de Baja California, Facultad de Ingeniería Arquitectura y Diseño, Carretera Transpeninsular Ensenada-Tijuana Número 3917, Colonia Playitas. juarezv@uabc.edu.mx Ensenada, B.C., México C.P. 22860.

Resumen

Con la evolución de los sistemas de manufactura a partir de la década de los 80's, la manufactura aditiva ha encontrado un área de desarrollo que depende directamente de las tecnologías emergentes y de los materiales en desarrollo. A pesar de la flexibilidad de las diferentes tecnologías asociadas a la manufactura aditiva y la libertad de diseño que esta conlleva, existe la limitación de calibración de los equipos y el desarrollo de componentes dependientes de las geometrías básicas que puedan definir las características de cualquier componente o ensamble. El propósito del presente documento es presentar una plantilla que sirva de referencia para la definición de la capacidad de equipos de impresión que emplean la tecnología de Fabricación por Filamento Fundido. En los resultados se presenta una propuesta de diseño de plantilla que pueden ser utilizada por los usuarios de esta tecnología para definir la capacidad de su proceso de fabricación en función de la definición de las características propuesta por los elementos geométricos.

Palabras clave—Manufactura Aditiva, Fabricación por Filamento Fundido, geometrías, plantillas.

Abstract

With the evolution of the manufacturing systems since 1980's, additive manufacturing has found an area of development that directly depends on emerging technologies and developing materials. Despite the flexibility of the different technologies associated with additive manufacturing and the freedom of design that this entails, there is the limitation of equipment calibration and development of components dependent on the basic geometries that define the component or assembly. The purpose of this document is to expose a template that serves as a reference for the definition of capacity of printing equipment using the Fused Filament Fabrication technology.

The results present a template design proposal that can be used by users of this technology to define the capacity of their manufacturing process based on the definition of the characteristics of the geometric elements.

Keywords— Additive Manufacturing, Fused Filament Fabrication, geometries, template.

1. INTRODUCCIÓN

La manufactura Aditiva (MA), se ha convertido en una alternativa de fabricación de componentes, ensambles y sub ensambles con diseños complejos, todas aquellas piezas que por su naturaleza requieren de al menos dos procesos de fabricación para generar el producto final [1]. Los nuevos sistemas de producción se encuentran divididos en dos grandes áreas; la Manufactura Aditiva (MA) y la Manufactura Sustractiva (MS) [2]. La MS o manufactura clásica, ha evolucionado en la generación de métodos alternativos de corte láser, nuevas estrategias de gestión o administración de la producción, así como las nuevas opciones de capacitación y entrenamiento del factor humano enfocadas en actividades multidisciplinarias.

Por otro lado, la MA como alternativa de producción, generó la apertura al desarrollo de diversas metodologías y alternativas de manufactura [3]. Ante esta innovación, el nivel de competencia de la MA contra la MS se ha visto favorecido para la MA en cuanto a la generación de componentes personalizados y componentes con características particulares establecidas por los usuarios. Sin embargo, el nivel de reproducibilidad y calidad de los componentes elaborados por MA distan mucho de lograr el equilibrio contra la MS, debido a la variabilidad que los equipos de impresión generan, haciendo evidentes las debilidades que la MA tiene con respecto a la calidad de los productos y al nivel de productividad [2, 4].

En el contexto de la MA, existen siete tecnologías que integran la parte esencial de este sistema de producción, dichas tecnologías son: Estereolitografía, Modelado por Deposición Fundida o Fabricación por Filamento Fundido, Fabricación de Objetos Laminados, Sinterizado Selectivo por Láser, Modelado de Red Dirigido por Láser y Fusión por Haz de Electrón [5]. Con esta variedad, es posible decir que cada una de las categorías existentes cuenta con sus propias características; tales como calidad del acabado, resistencia, capacidad de producción, entre otras [6]. Con la finalidad de ejemplificar esta información, se presenta la Tabla 1, la cual describe los tipos de procesos de MA y los materiales utilizados por cada tecnología.

Tabla 1. **Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.** Procesos de manufactura aditiva y materiales utilizados.

Proceso	Materiales utilizados
---------	-----------------------

Polimerización en tina.	Fotopolímeros [7]
Expulsión a chorro de material.	Polímeros, ceras [5].
Expulsión a chorro de aglutinante.	Polímeros, metales, arena de fundición [8].
Extrusión de material.	Polímeros [9].
Fusión por cama de polvo.	Polímeros y metales [4].
Laminación por hoja.	Papel y metales [10].
Deposición por energía directa.	Metales [4].

Fuente: elaboración propia.

Debido a su naturaleza, cada proceso de MA tiene sus propias fortalezas y/o sus debilidades. Según [11] y [12] las fortalezas y/o debilidades se asocian a las siguientes características:

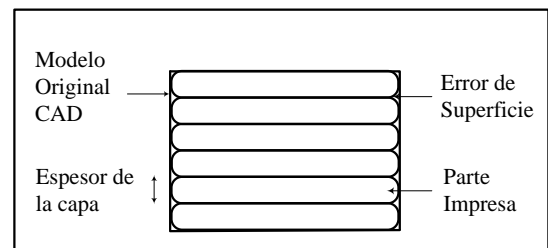
- La velocidad a la cual se puede construir la parte (velocidad de construcción).
- Los materiales que pueden utilizarse (típicamente diferentes polímeros o metales, pero incluso ceras y papel para algunas aplicaciones).
- Lo adecuado de la dimensión y la calidad de la superficie de acabado en partes producidas.
- Las propiedades de los materiales en partes producidas.
- Costos de los equipos y los materiales.
- Accesibilidad y seguridad relacionada con la complejidad de la operación.

Como se puede observar en los elementos relacionados con las debilidades de los sistemas de producción por MA, la dimensión y la calidad pertenecen al rubro que se asocia a la definición de los elementos geométricos que conforman a un componente. Debido a ello, el uso de elementos esféricos o triangulares, se convierten en un área de oportunidad para que los diseñadores de estos componentes puedan considerar las restricciones a los que se puede someter el diseño del componente, es decir, el diseñador puede percibir desde la etapa de diseño la capacidad que su proceso de impresión puede generar.

La Fabricación por Filamento Fundido (FFF) se ha caracterizado por su pobre calidad en el acabado de la superficie (ver Figura 1). Los componentes de la superficie influyen directamente en el desempeño de las partes. Generalmente, este desempeño impacta en las siguientes

áreas; a) apariencia y características geométricas de la parte o de su rol subsecuente en operaciones, tales como soldadura, adhesión, pintura y revestimiento; b) Resistencia a la corrosión; c) Efectividad de lubricación durante el proceso de manufactura y a través de la vida de servicio de la parte; d) Iniciación y propagación de grietas, las cuales se convierten en potenciales generadores de falla que son resultado de los defectos de una superficie rugosa, con rayones, costuras y con zonas afectadas por el calor. Su efecto es el inicio de debilidad que se puede convertir en una potencial falla prematura de la pieza a través de la fatiga. Otra área en la que impacta el desempeño de la superficie es en la conductividad térmica y eléctrica, la rugosidad en la superficies, por ejemplo, tienen menor conductividad térmica y eléctrica que las superficies lisas [13].

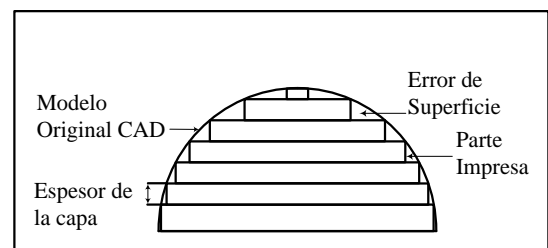
Figura 1. Defectos de superficie.



Fuente: elaboración propia.

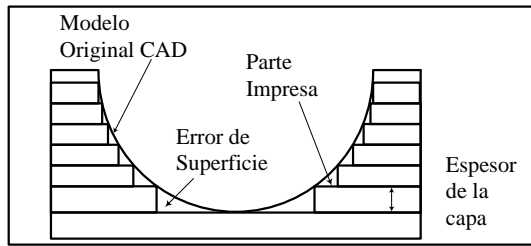
Weeren, Agarwala, Jamalabad, y Bandyophadyay [14] especifican que las piezas elaboradas por FFF sufren de defecto de rugosidad la cual es clasificada en defectos de superficie (Figura 2) y en defectos internos (Figura 3). Según [8, 14, 15], los defectos de superficie son generados por el error de deposición de hilo y escalonamiento de material. Los defectos internos, por lo contrario, se generan debido a los huecos dentro del perímetro por el depósito de material y a las curvaturas de la pieza [2], [5].

Figura 2. Defectos de superficie en parte esférica.



Fuente: elaboración propia.

Figura 3. Defectos internos en cavidad.



Fuente: elaboración propia.

2. METODOLOGÍA

La presente investigación se desarrolló en tres fases:

Fase 1. Investigación bibliográfica. Búsqueda en las bases de datos EBSCO, Emerald y Springer. La búsqueda se enfoca en el conjunto de elementos geométricos empleados para la fabricación de compontes en FFF, para ello se utiliza la sintaxis en combinación con los conceptos geometric, shapes, manufacturing, Fused Filament Fabricatio, Fused Deposition Modeling.

Fase 2. Desarrollo digital de los componentes. En esta etapa se definieron los requerimientos del usuario con base en los resultados de la búsqueda bibliográfica, la determinación de las especificaciones funcionales definidas en las similitudes de ensambles y componentes identificados en la bibliografía, las especificaciones de diseño a partir de los formatos de los equipos de impresión y finalmente la configuración de las geometrías base (círculos, paralelogramos y ángulos).

Fase 3. Integración de los componentes en plantillas. En esta parte se hace uso del software de diseño SolidWorks® para integrar todos los elementos geométricos en una sola plantilla.

3. RESULTADOS

Como resultado de la revisión, es posible destacar a [16] que desarrollaron un estudio para comparar la capacidad y el desempeño de los métodos de MA más populares. En su estudio consideraron Esterolitografía (SLA) Sinterizado Selectivo Laser (SLS) y Modelado por Deposición Fundida (FDM) o Fabricación por Filamento Fundido (FFF).

Los elementos en análisis fueron desarrollados con la finalidad de exponer el propósito y la característica de la geometría. La Tabla 2 presenta la relación entre característica descriptiva de la geometría y propósito para el cual se le asignan atributos específicos de estudio.

Tabla 2. Características geométricas de los componentes de acuerdo con su propósito para el proceso de impresión FFF.

Característica	Propósito
Base plana	Planicidad y rectitud
Cubo	Cuadratura, paralelismo, precisión lineal repetibilidad.

Perforación cilíndrica	Redondez, cilindridad, precisión y repetibilidad de radio (interno)
Esfera	Esfera, precisión relativa y repetibilidad de una superficie inclinada con cambios continuos
Cilindro sólido	Redondez, cilindridad, precisión y repetibilidad de radio (externo)
Cilindro hueco	Redondez, cilindridad y coaxialidad de cilindro
Cono	Conicidad, perfil inclinado y estrechamiento
Superficies con ángulo	Angularidad, precisión y repetibilidad de ángulos de superficies angulares

Fuente: Shah, Racasan, y Bills, (2016).

Con estas características definidas y de acuerdo con las necesidades del proyecto, el objetivo es evaluar precisión, repetibilidad y terminado de la superficie, las cuales al contar con diferentes atributos permiten considerar la mayor cantidad de características que afectan el desempeño de la herramienta, así como la ruta que esta debe seguir al cubrir el recorrido durante el proceso de impresión.

Según [17], el uso de geometrías y su desarrollo para estudio debe considerar las siguientes restricciones:

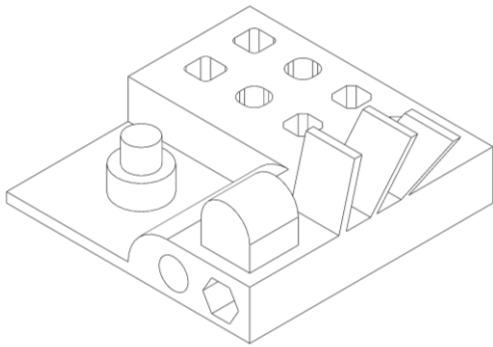
- Contar con un número considerable de características pequeñas, medianas y grandes,
- No debe consumir grandes cantidades de material,
- Debe contar con muchas características de una parte “real”,
- Debe contar con formas geométricas simples, permitiendo una perfecta definición y un control fácil de la geometría,
- Debe permitir repetibilidad de mediciones, esta característica es importante en el caso de que se utilicen instrumentos de medición que hagan contacto físico con el elemento impreso,
- No debe requerir de tratamiento posterior o de una intervención manual (no requiere estructuras de soporte) y;
- No debe consumir gran cantidad de tiempo para la construcción.

Considerando las restricciones previamente mencionadas y los resultados de la revisión bibliográfica, se hizo uso del software de diseño SolidWowks para el trazo de la pieza utilizando mm como unidad de medición. Se comenzó con un bloque de 50x50x10. A este bloque se le realizó un desbaste de 8 a partir de un corte de 25x25, para dejar un redondeo de radio de 8 sobre la esquina de desbaste. En una de las caras se realizaron dos perforaciones, una circular de diámetro 6 a una profundidad de 8 y una perforación hexagonal de base 3.69 y profundidad 28. Cuenta además con un pin de dos cilindros ubicado en la base de la plantilla con un diámetro de 10 y altura de 5 así como un segundo cilindro de base 6 con altura 5. A la plantilla se integra además una matriz formada

por 8 cuadros de 5x5, los vértices de los cuadros han sido redondeados por las esquinas a radios de 1 y 2 (4 piezas) y chaflanes de 1 y 2 (4 piezas). Para realizar pruebas de profundidad, la matriz ha sido devastada a una profundidad de 5. Además, se integraron tres bloques de 1.5x10 a una altura de 5, con inclinaciones de 25, 50 y 75 grados. Finalmente se integra una geometría tipo bóveda, con base cuadrangular de 5 unidades, y un arco con diámetro de 5 unidades.

En la Figura 4 se presenta la vista isométrica de la plantilla propuesta para la identificación de los elementos geométricos y su posición.

Figura 4. Plantilla integrada por los elementos identificados en la búsqueda bibliográfica.



Fuente: elaboración propia.

4. CONCLUSIONES

La revisión bibliográfica presenta cinco opciones de plantillas en las que se hace uso de cortes verticales, horizontales y curvos para definir la capacidad de construcción de los equipos de Fabricación por Filamento Fundido. El antecedente recae en el efecto de escalonado que genera el proceso. Este efecto no se percibe directamente en componentes con geometrías relacionada a paralelogramos tales como las pirámides, los cubos y los barrenos de base cuadrangular.

La plantilla propuesta se basa en dos principios, a) elementos que son construidos a partir de la apilación de material capa por capa y b) los elementos que son generados por la ausencia de material. En el primer caso se cuenta con el conjunto de cilindros, la bóveda y las placas con posición angulada. Estos elementos además de definir el proceso de construcción por apilamiento son elementos que caracterizan características geométricas asociadas a arcos, círculos y ángulos, los cuales durante el proceso de impresión requieren de una definición de capa exacta para reducir el efecto de escalonamientos.

Por otro lado, se cuenta con los elementos de carácter hueco o con ausencia de material, tales como las perforaciones cilíndricas y hexagonales ubicadas en la cara lateral de la placa y las perforaciones cilíndricas y cuadrangulares

ubicadas en la cara superior de la placa. El proceso de impresión del elemento cilíndrico ubicado en la cara lateral de la plantilla tiene la capacidad de definir el nivel de escalonamiento en una geometría que no requiere soporte y que por su naturaleza requiere de un arco. A su vez, el hexágono representa la posibilidad de que el equipo de impresión genere una geometría basada en líneas, esto permite una definición geometría de mayor precisión.

Con respecto a los elementos ubicados en la cara superior de la plantilla es necesario declarar que estos elementos fueron modificados por el efecto de chaflán y redondeo, que a pesar de no requerir soportes permiten que el proceso de impresión afecte a la definición de la geometría debido a la deposición de material. Este defecto se genera por el cambio de dirección del extrusor al momento de imprimir una línea y cambia de en dirección de arco o de otra línea a 45°.

Como se mencionó al principio, el objetivo de esta investigación es proporcionar un elemento de referencia para los usuarios de los equipos de impresión por filamento fundido. La plantilla propuesta integra al menos el 80% de las geometrías base empleadas para la generación de componentes impresos por FFF. Esta plantilla permitirá a los usuarios, realizar un análisis de la definición de sus impresiones a partir de las dimensiones de la geometría, las características de las geometrías y la posición que estas guardan durante el proceso de impresión.

Es importante resaltar que la calidad de un componente impreso por la tecnología FFF depende también de las condiciones de operación del equipo, es decir que el equipo de impresión cuente con boquillas de diámetro variable, que la calibración de la cama este dentro de la tolerancia permitida, que la velocidad de extrusión del material se realice en función de las características de este, entre otras.

Finalmente, se deja a consideración del lector, la orientación del componente, la cual definitivamente alterara la definición de los componentes en función del plano de impresión, por ello se recomienda que la base de la plantilla se oriente de forma paralela a la cama de impresión considerando como base el eje frontal X y el eje lateral Y.

5. REFERENCIAS

- [1] Businesswire. "Global smart factory market research report 2022-2027: Analysis of SCADA, PM, MES, Industrial Safety, Industrial Sensors, Industrial Robots, Industrial 3d Printers, Machine Vision Systems." Business wire. <https://www.businesswire.com/news/home/20221205005517/en/Global-Smart-Factory-Market-Research-Report-2022-2027-Analysis-of-SCADA-PAM-MES-Industrial-Safety-Industrial-Sensors-Industrial-Robots-Industrial-3D-Printers-Machine-Vision-Systems---ResearchAndMarkets.com> (accessed 12/06/2022, 2022).
- [2] W. Karwowski, S. Trzcielinski, B. Mrugalska, M. Di Nicolantonio, and E. Rossi, "Advances in

- Manufacturing, Production Management and Process Control," in *AHFE International Conference on Advanced Production Management and Process Control*, Washington, D.C. U.S.A., 2019: Springer, p. 506, doi: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-94196-7>.
- [3] O. Economics, "The Future of Global Manufacturing," Oxford Economics, Oxford, U.K., 2019.06.15 2020, vol. 1. [Online]. Available: <https://www.oxfordeconomics.com/>
- [4] T. S. Srivatsan and T. S. Sudarchan, *Additive Manufacturing. Innovations, Advances, and Applications*, 1 ed. Boca Raton, FL, U.S.A.: Taylor & Francis (in English), 2016, p. 444.
- [5] B. Rylands, T. Böhme, R. Gorkin, J. Fan, and T. Birtchnell, "The adoption process and impact of additive manufacturing on manufacturing systems," (in English), *Journal of Manufacturing Technology Management*, vol. 27, no. 7, pp. 969-989, 2016, doi: 10.1108/jmtm-12-2015-0117.
- [6] N. Nikitakos, I. Dagkinis, D. Papachristos, G. Georgantis, and E. Kostidi, "Economics in 3D printing," in *3D Printing: Applications in Medicine and Surgery*: Elsevier Inc., 2020, ch. 6, pp. 85-95.
- [7] D. Bourell, J. J. Beaman, H. L. Marcurs, and J. W. Barlow, "Solid Freeform Fabrication An Advanced Manufacturing Approach," in *International Solid Freeform Fabrication Symposium*, Austin, U.S.A., T. U. o. T. a. Austin, Ed., 1990, Austin, U.S.A., in 1990 International Solid Freeform Fabrication Symposium, 1990, p. 7, doi: <https://doi.org/10.15781/T2W08X029>. [Online]. Available: <https://dx.doi.org/10.15781/T2W08X029>
- [8] I. Campbell, D. Bourell, and I. Gibson, "Additive manufacturing: rapid prototyping comes of age," *Rapid Prototyping Journal*, vol. 18, no. 4, pp. 255-258, 2012, doi: <https://doi.org/10.1108/13552541211231563>.
- [9] D. M. C. Santos, A. E. M. Pertence, H. B. Campos, and P. R. Cetlin, "The development of 3D models through rapid prototyping concepts," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 169, no. 1, pp. 1-4, 2005, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2004.06.035.
- [10] I. Campbell and P. Dicknes, "Rapid Prototyping: A Global View," in *International Solid Free Form Fabrications Symposium*, Austin, T. U. o. T. a. Austin, Ed., 1994, doi: 10.15781/T2M03ZG6J. [Online]. Available: <https://dx.doi.org/10.15781/T2M03ZG6J>
- [11] K. Hartke, "Manufacturing Technology Support (MATES). Task Order 0021: Air Force Technology and Industrial Base Research and Analysis, Subtask Order 06: Direct Digital Manufacturing," MOUND LASER AND PHOTONICS CENTER INC MAIMISBURG OH, 2011.
- [12] J. Scott, N. Gupta, C. Weber, S. Newsome, T. Wohlers, and T. Caffrey, "Additive Manufacturing: Status and Opportunities," Science and Technology Policy Institute, Australia, 2012, vol. 1. [Online]. Available: https://cgsr.llnl.gov/content/assets/docs/IDA_AdditiveM3D_33012_Final.pdf
- [13] S. Kalpakjian and S. R. Schmid, *Manufacturing, engineering and technology [In spanish: Manufactura, ingeniería y tecnología]*, 7th ed. New Jersey, USA: Pearson educación, 2014.
- [14] R. V. Weeren *et al.*, "Quality of parts processed by fused deposition," in *1995 International Solid Freeform Fabrication Symposium*, Austin, 1995: The University of Texas at Austin. [Online]. Available: <https://repositories.lib.utexas.edu/handle/2152/69339>
- [15] O. A. Mohamed, S. H. Masood, and J. L. Bhowmik, "Optimization of fused deposition modeling process parameters: a review of current research and future prospects," *Advances in Manufacturing*, vol. 3, no. 1, pp. 42-53, 2015, doi: <https://doi.org/10.1007/s40436-014-0097-7>.
- [16] P. Shah, R. Racasan, and P. Bills, "Comparison of different additive manufacturing methods using computed tomography," *Case studies in nondestructive testing and evaluation*, vol. 6, pp. 69-78, 2016.
- [17] S. Moylan, J. Slotwinski, A. Cooke, K. Jurrens, and M. A. Donmez, "Proposal for a standardized test artifact for additive manufacturing machines and processes," in *Proceedings of the 2012 annual international solid freeform fabrication symposium*, Austin, TX, S. Scholar, Ed., 2012: NIST, pp. 6-8. [Online]. Available: <https://www.semanticscholar.org/paper/Proposal-for-a-standardized-test-artifact-for-and-%7C-Moylan-Slotwinski/a79666a0a7916deb3bb2672125f589c4c439d6ed>