

Metodología para la fabricación híbrida de piezas mecánicas usando optimización topológica

Eduardo José Ramírez González¹, Manuela Zuluaga Aristizabal², Juan David Contreras Perez³

¹Semillero de investigación IOMICAS, Centro de Automatización de Procesos CAP, Pontificia Universidad Javeriana, Colombia. Email: eduardo1@javerianacali.edu.co

²Semillero de investigación IOMICAS, Centro de Automatización de Procesos CAP, Pontificia Universidad Javeriana, Colombia. Email: manuzuluaga@javerianacali.edu.co

³Grupo de Automática y Robótica GAR, Centro de Automatización de Procesos CAP, Pontificia Universidad Javeriana, Colombia. Email: juandavid.contreras@javerianacali.edu.co

Resumen

La impresión 3D ha posibilitado la manufactura de piezas con geometrías complejas, así como abordar una alta flexibilidad en la producción sin incurrir en grandes costos de inversión. Sin embargo, factores como la baja resistencia termo-mecánica, los largos tiempos de fabricación y la limitada exactitud dimensional, han hecho que en aplicaciones donde estos factores sean críticos, la impresión 3D no sea competencia para los métodos tradicionales como el mecanizado CNC y el moldeo por inyección.

Previamente se han obtenido resultados importantes en el mejoramiento de la relación peso-resistencia al aplicar optimización topológica en el diseño de piezas para su fabricación con manufactura aditiva, sin embargo, cuando los requerimientos de resistencia mecánica superan las propiedades mecánicas de los termoplásticos disponibles se debe recurrir a estrategias de fabricación que combinen las ventajas de la impresión 3D con las ventajas mecánicas de otros métodos de fabricación y otros materiales de fabricación tales como el mecanizado CNC y el moldeo de materiales compuestos, esta combinación se conoce como fabricación híbrida.

De acuerdo con lo anterior, en este proyecto, se presenta una metodología para optimizar la relación peso-resistencia de piezas mediante fabricación híbrida usando optimización topológica. La metodología consiste primero en aplicar la optimización topológica a una pieza que ya cumple con un diseño funcional, a partir del resultado de la optimización topológica se separa la fabricación en dos, primero se realiza un submodelo para impresión 3D a partir de las geometrías que no están asociadas a cargas mecánicas y segundo un submodelo que sería fabricado mediante mecanizado CNC o moldeo con las geometrías que llevan en mayor los esfuerzos a los que se somete la pieza. Seguidamente se diseñan una interfaz que permita combinar ambos submodelos de forma íntegra y se procede a realizar la respectiva fabricación y ensamble. Finalmente se aplica esta metodología en la fabricación de la horquilla de un robot móvil y se evalúa el resultado para la combinación de impresión 3D FDM - mecanizado CNC e impresión 3D FDM y Moldeo de resina.

Palabras clave: Fabricación híbrida, impresión 3D, Optimización topológica.

Abstract

3D printing has made it possible to manufacture parts with complex geometries, as well as to address high flexibility in production without incurring large investment costs. However, factors such as low thermo-mechanical resistance, long manufacturing times and limited dimensional accuracy have meant that in applications where these factors are critical, 3D printing is not a match for traditional methods such as CNC machining and injection molding.

Previously, important results have been obtained in the improvement of the weight-resistance relationship by applying topological optimization in the design of parts for their manufacture with additive manufacturing, however, when the mechanical resistance requirements exceed the mechanical properties of the available thermoplastics, it is necessary to resort to manufacturing strategies that combine the advantages of 3D printing with the mechanical advantages of other manufacturing methods and other manufacturing materials such as CNC machining and composite molding, this combination is known as hybrid manufacturing.

In accordance with the above, in this project, a methodology is presented to optimize the weight-resistance ratio of parts through hybrid manufacturing using topological optimization. The methodology consists first of applying the topological optimization to a piece that already complies with a functional design, from the result of the topological optimization the manufacturing is separated into two, first a submodel is made for 3D printing from the geometries that are not associated with mechanical loads and secondly, a submodel that would be manufactured by CNC machining or molding with the geometries that bear the greatest stresses to which the part is subjected. Next, an interface is designed that allows both submodels to be fully combined and the respective manufacturing

and assembly is carried out. Finally, this methodology is applied in the manufacture of a mobile robot fork and the result is evaluated for the combination of 3D FDM printing - CNC machining and 3D FDM printing and resin molding.

Keywords: Hybrid manufacturing, 3D printing, Topology optimization.

1. Introducción

La impresión en tres dimensiones (3D) o manufactura aditiva es una técnica de manufactura avanzada en la que un objeto sólido tridimensional es fabricado a partir de un archivo digital mediante la construcción capa por capa del material [1]. Existen diferentes tecnologías de impresión 3D, sin embargo, la tecnología más popular para aplicaciones de prototipado es el modelado por deposición fundida (FDM) también conocida como fabricación por fundición de filamentos (FFF). Este método de impresión 3D se ha democratizado en los últimos años gracias a su bajo costo, la amplia gama de materiales imprimibles disponibles y por ser fácil de usar [2].

En la tecnología FDM, un filamento es extruido a través de una boquilla al tiempo que un sistema de movimiento controla donde se deposita el material fundido línea por línea y capa por capa (ver Figura 1). El resultado de una impresión en FDM se puede observar en la Figura 2, en esta imagen se observa la anatomía interna de una pieza fabricada mediante impresión 3D, tanto el porcentaje de relleno como el espesor de las superficies externas pueden configurarse para cambiar la resistencia de la pieza a expensas del consumo de material [3]. Por otro lado, parámetros como la altura de capa y la velocidad de impresión permiten afectar la calidad estética de la pieza a expensas del tiempo de impresión. En conclusión, la impresión 3D por FDM permite para una misma pieza variar de diferentes maneras la relación resistencia-calidad-costo para adaptarse a los requerimientos mecánicos y estéticos.

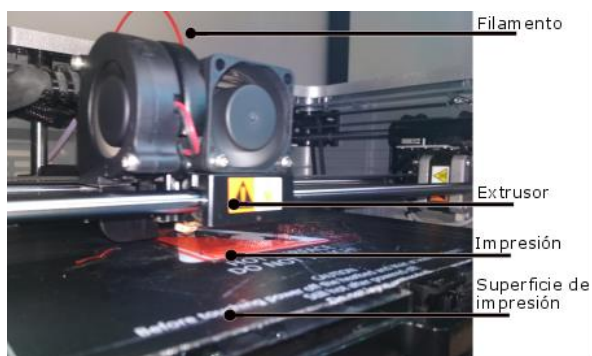


Figura 1. Partes de una impresora 3D FDM. Fuente: elaboración propia

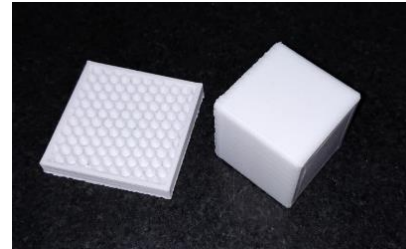


Figura 2. Pieza impresa en 3D

Además de la versatilidad en la parametrización mencionada, la impresión tipo FDM ha posibilitado la manufactura de piezas con geometrías complejas e incluso geometrías imposibles de fabricar con los métodos de manufactura sustractiva tradicional [4]. Adicionalmente, la impresión 3D permite abordar una alta flexibilidad en la producción sin incurrir en grandes costos de inversión gracias a que la maquina no requiere cambios físicos para imprimir piezas geoméricamente diferentes. Sin embargo, factores como la baja resistencia termo-mecánica, los largos tiempos de fabricación y la limitada exactitud dimensional, han hecho que en aplicaciones donde estos factores sean críticos, la impresión 3D no sea competencia para los métodos tradicionales como el mecanizado CNC y el moldeo por inyección [5][6]. Considerando las limitaciones de la impresión 3D anteriormente mencionadas, es importante que nuevas estrategias de diseño y manufactura sean aplicadas para hacer de la impresión 3D un proceso de manufactura más eficiente no solo en aplicaciones de prototipado sino también en productos de ingeniería.

Como respuesta a lo anterior, una estrategia que ha tomado fuerza gracias a la democratización de la impresión 3D es la manufactura híbrida.

De acuerdo con [7], la tecnología de fabricación híbrida o manufactura híbrida, ha atraído un interés significativo tanto en el mundo académico como en el industrial debido a la capacidad de fabricar productos de una manera más eficiente y productiva. Aunque no existe un consenso específico sobre la definición del término "procesos híbridos", los investigadores han explorado una serie de enfoques para combinar diferentes procesos de fabricación con objetivos similares de mejorar la integridad de la superficie, aumentar la tasa de eliminación de material, reducir el desgaste de las herramientas y reducir el tiempo de producción. y ampliar las áreas de aplicación.

Adicionalmente, la optimización topológica ha emergido como una útil y poderosa herramienta para apoyar los procesos de diseño desde las nuevas

capacidades computacionales [8]. En general, el objetivo de la optimización topológica es encontrar el mejor uso de material para un miembro estructural que está sujeto a una o múltiples cargas. Para resolver el problema de optimización topológica se emplean dos tipos de soluciones, el método de la densidad y el método de la homogenización, los detalles de la aplicación de estos métodos pueden encontrarse en las referencias [9] y [10].

En este proyecto se presenta una metodología realizar procesos de manufactura híbrida basado en los resultados de la optimización topológica para piezas que tienen que resistir cargas mecánicas, pero mantener una geometría superficial con fines funcionales o estéticos. La hipótesis consiste en que al utilizar métodos de fabricación tradicionales para moldear la pieza a la geometría optimizada y posteriormente usar impresión 3D para rellenar el volumen donde no se requiere resistencia mecánica, producirá piezas con una mejor relación peso resistencia. Esta hipótesis será evaluada solo por métodos experimentales ya que la naturaleza anisotrópica de las piezas fabricadas de forma híbrida hace muy difícil y costoso el análisis computacional.

2. Metodología

Para evaluar la hipótesis, se definirá un procedimiento para fabricar una media horquilla por 3 diferentes métodos, dos de manufactura híbrida y otra solo con impresión 3D FDM, usando optimización topológica para definir la geometría que se fabricará con cada método (CNC, resina e impresión 3D). Finalmente, las piezas resultantes se probarán en una máquina de ensayos para evaluar su resistencia.

2.1. Materiales y equipos

Para el modelado 3D y la aplicación del análisis topológico se usa el software Solidworks versión 2021. Este software incluye el estudio topológico desde la versión 2018 y permite optimizar alrededor de tres objetivos: mayor relación peso-resistencia, minimizar el desplazamiento máximo y minimizar masa con restricción de desplazamiento. Para los objetivos de este proyecto se usa la optimización de la relación peso-resistencia.

Para la impresión de las piezas se utiliza la impresora 3D Dremel 3D40 mostrada en la Figura 3. Este equipo solo puede imprimir filamento de Ácido polilactico (PLA) con un volumen máximo de trabajo de 255x155x170mm, por lo que las piezas de prueba deberán estar limitadas a estas dimensiones y material. Para la fabricación mediante mecanizado CNC, se utiliza un centro de mecanizado CNC de 3 ejes mostrado en la Figura 4. Al ser una máquina de 3 ejes, las geometrías que se puede mecanizar son limitadas.

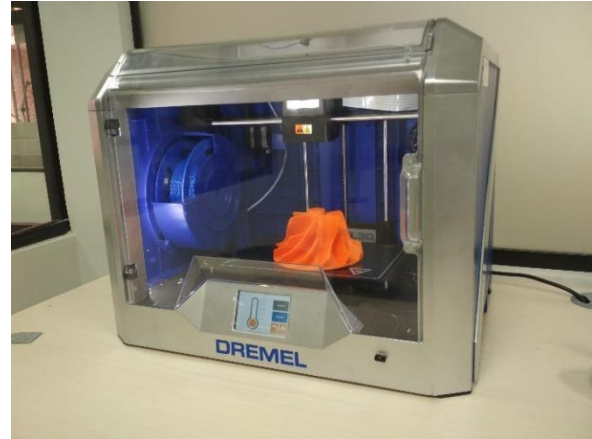


Figura 3. Impresora 3D Dremel 3D40



Figura 4. Centro de mecanizado CNC

Para la parametrización de la impresora se utiliza el software Ultimaker CURA, y para la programación de la maquina CNC se utiliza MasterCAM.

Finalmente, se cuenta con una maquina universal de ensayos Instron 5960 para realizar las pruebas de resistencia.

2.2. Procedimiento

A continuación se describen los pasos a seguir para realizar el analisis topologico, fabricacion híbrida y evaluacion mecanica de una media horquilla diseñada para funcionar con una rueda caster activa de un robot movil de navegacion externa.

La pieza de trabajo en si contexto inicial se presenta en la Figura 4, donde se observa que la pieza se encuentra apoyada sobre un motor al cual se acopla una rueda, en la parte superior de la pieza hay una cabidad para un rodamiento sobre el que toda la pieza gira en un eje vertical, soportando la carga de el robot movil y permitiendo su movimiento de forma omnidireccional. Esta pieza fue elegida como objeto de estudio ya que presenta un caso de aplicación donde la relacion peso-resistencia es crucial y a su vez esta sometida a

esfuerzos combinados de flexion, compresion y torsion.

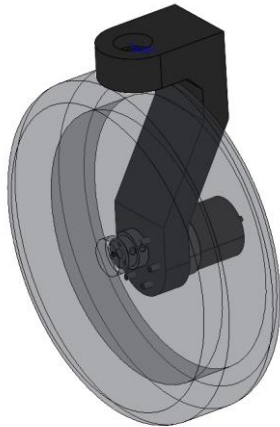


Figura 5. Pieza de trabajo, media horquilla para rueda omnidireccional

2.2.1. Optimización topológica y preparación del modelo

Primeramente, a partir del modelo 3D de la pieza, se realiza una optimización topológica utilizando las herramientas de simulación de SolidWorks. Para parametrizar el modelo y la simulación se selecciona ABS como material y se dispone una carga de 200N sobre el apoyo del rodamiento del eje vertical, también se define una sujeción en la superficie donde se acopla el motor y se agrega una región de conservación sobre las superficies donde pasan tornillo y rodamientos. Finalmente se realiza un enmallado fino como se muestra en la Figura 6. Como objetivo de optimización se programa optimizar la relación peso-resistencia reduciendo la masa en un 60%. El resultado de la simulación se presenta en la Figura 7.



Figura 6. Cargas, sujeciones, restricciones y malla en la optimización topológica de la pieza.

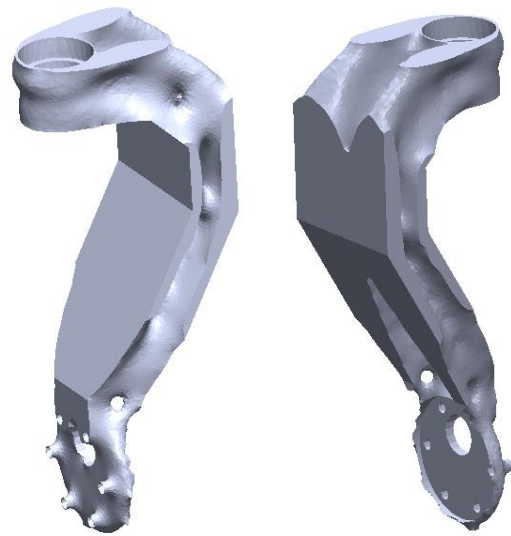


Figura 7. Modelo resultado de la optimización topológica.

El modelo resultante representa un reto a nivel de fabricación por incluir geometrías internas y curvas que no se pueden alcanzar con el mecanizado tradicional, a pesar de que este tipo de modelos puede ser fabricado en impresión 3D de forma directa, este proyecto busca evaluar la manufactura híbrida como alternativa a mejorar la resistencia de la pieza sin afectar su estética y funcionalidad. Por lo anterior, el modelo optimizado es post procesado para que pueda ser fabricado mediante mecanizado CNC de 3 ejes. El modelo final resultante se muestra en la figura 8.

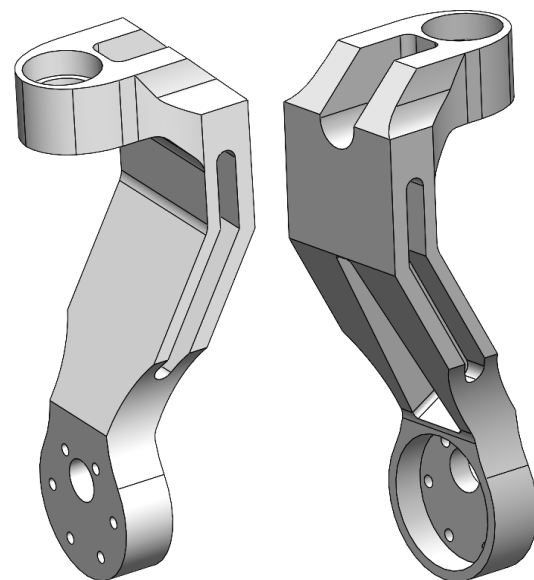


Figura 8. Modelo optimizado post procesado para fabricación por mecanizado CNC.

2.2.2. Manufactura híbrida mecanizado-impresión 3D

La primera estrategia de manufactura híbrida consiste en realizar la pieza optimizado mediante mecanizado y el resto de la pieza donde las cargas son mejores utilizar impresión 3D. Para esto, se utiliza el centro de mecanizado para fabricar la pieza de la Figura 8, esto requiere de múltiples montajes y un intercambio constante de herramientas de corte. Como material de trabajo se usó un bloque de polietileno de ultra alto peso molecular el cual se conoce comercialmente como Empack. Para completar la pieza, se utiliza la operación de sustracción de SolidWorks, con esto se elimina el modelo optimizado de la pieza original dejando como sólido las partes que se deben imprimir en 3D. La pieza resultante del proceso de mecanizado se presenta en la Figura 9, para unir las piezas se utiliza una capa de pegante epoxico.



Figura 9. Pieza resultante fabricación CNC con impresión 3D.

2.3. Manufactura híbrida con curado de resina e impresión 3D

Este segundo método consiste en utilizar la impresión 3D para fabricar la pieza dejando un vacío interno que sirva como molde para rellenar con resina epoxica. Para esto, se utiliza nuevamente la operación de sustracción en Solidworks, pero esta vez dejando un espesor superficial de 1 mm para mantener todo el exterior. En la Figura 10 se presenta un modelo e impresión en corte en plano medio para poder visualizar el resultado de la sustracción. El siguiente paso es preparar la resina y rellenar con ella el modelo impreso, esperando 24 horas para que cure completamente a temperatura ambiente.

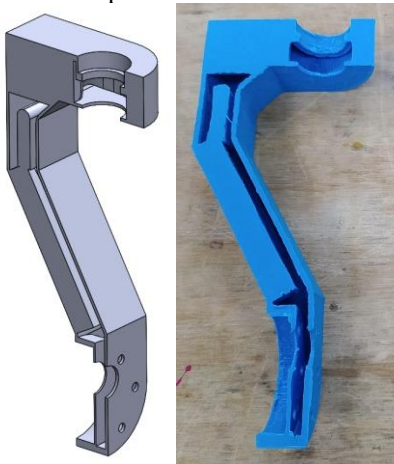


Figura 10. Modelo e impresión del molde impreso para resina.

2.3.1. Pieza de referencia

Con el objetivo de evaluar la relación peso-resistencia de las piezas fabricadas, se imprime en 3D una pieza de referencia la cual tiene como característica que se parametriza para que la parte que corresponde al modelo optimizado se imprima totalmente sólida, mientras que el resto del volumen queda hueco.

2.3.2. Pruebas de resistencia

Las piezas fabricadas son montadas en la máquina universal de ensayos para evaluar su resistencia según las cargas para las que fueron diseñadas. La carga a compresión se aplica progresivamente a razón de 1 mm por minuto hasta llegar a la falla mecánica, registrando la carga aplicada en Newtons en función de la extensión en milímetros. Para emular el montaje real de la pieza, se fabrica una barra cilíndrica perforada con las mismas dimensiones del motor el cual se atraviesa con un eje sobre el que se apoya todo el montaje, en la parte superior se monta la balinera y un eje vertical sobre el que se aplica la carga. En la Figura 11 se muestra como ejemplo el montaje de la pieza fabricada en mecanizado CNC. Adicionalmente, se presenta en la Figura 12 la pieza fabricada con molde de resina en el momento de la falla.



Figura 11. Montaje de la pieza en la máquina de ensayos.

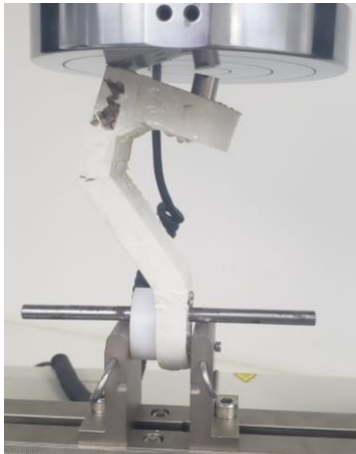


Figura 12. Pieza en resina al momento de la falla por fractura.

3. Resultados

Los resultados de los ensayos de resistencia a compresión de cada pieza se presentan en la Figura 13.

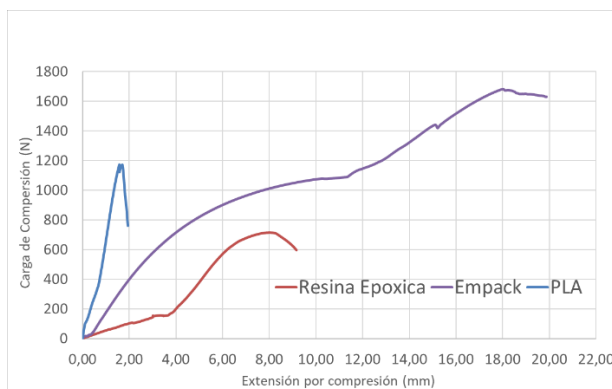


Figura 13. Resultados de las pruebas de resistencia a carga de compresión para las 3 piezas fabricadas.

Adicionalmente se presenta un resumen de los resultados en la Tabla 1, donde se exponen el tipo de falla de cada pieza, el peso medido, la resistencia máxima y la relación peso resistencia.

Pieza	Tipo de falla	Resistencia máxima (N)	Relacion Peso – resistencia (N/g)
Empack	Deformacion plastica	1643	17.91
Resina	Fractura	715	5.81
PLA	Separacion de capas	1186	11.53

De estos resultados se pueden identificar las siguientes percepciones:

- La pieza en Empack presenta la mayor resistencia final, sin embargo, presenta un alto grado de flexibilidad antes de la falla lo cual no es válido para la aplicación de la pieza ya que una

deformación tan elevada va a producir interferencia entre los elementos móviles.

- La pieza en resina resulto ser la de menos resistencia, pero no la más frágil como se espera de ese tipo de material. Esto se puede deber a que algunas zonas donde los esfuerzos son más altos quedaron con muy poco material homogéneo y la falla se presentó primero por la separación entre la resina y el PLA y después por la fractura de la resina.
- La pieza en PLA, que no uso manufactura hibrida presento un comportamiento eficiente para la aplicación de la pieza, ya que no presenta una alta deformación, pero resistió una carga intermedia en comparación a la de las otras dos piezas.
- La pieza en PLA presento una falla por separación de capas la cual es una falla típica de las piezas fabricadas por FDM, sin embargo, al escoger una correcta orientación de la pieza durante la impresión 3D permitió llegar a un límite de resistencia a la compresión aceptable. Si la pieza se hubiera orientado de otra forma durante la impresión, probablemente la resistencia sería menor.
- El tipo de falla en la pieza de Empack demostró que el usar el mecanizado sobre un material homogéneo permite tener piezas que no se fracturan tan fácilmente como ocurre con el PLA y la impresión 3D.
- La pieza en resina presento una falla por fractura producto de la rigidez del material. La resina epoxica tradicionalmente se usa como aglutinante en materiales fibroreforzados, pero al estar recibiendo toda la carga sin ningún refuerzo termina siendo más frágil que el PLA impreso.

Se debe tener en cuenta que el estudio solo evaluó el proceso de manufactura, para que los resultados sean concluyentes respecto a las propiedades físicas de los materiales se debe realizar el mismo procedimiento con el mismo material para impresión 3D y mecanizado. La mayor dificultad de esta prueba es que no se consigue comercialmente el PLA u otro material de impresión en bloques que puedan ser mecanizados, adicionalmente por ser termoplásticos son más difíciles de mecanizar.

4. Conclusiones

En este artículo se realizó un procedimiento experimental para comprobar la efectividad de combinar la fabricación hibrida y la optimización topológica en el mejoramiento de la resistencia mecánica de una pieza, dando como resultado una comprobación parcial de la hipótesis planteada, ya que, aunque las piezas que usaron mecanizado CNC tiene una mejor relación peso resistencia, tiene una mayor deformación para ante la misma carga, por otro lado, la pieza que uso resina como complemento resulto ser más frágil.

La optimización topológica genera geometrías que pueden resultar imposibles de fabricar mediante métodos tradicionales, lo que muestra la sinergia que existe entre esta estrategia de diseño y la impresión 3D, sin embargo, las propiedades mecánicas de los materiales de impresión dificultan su aprovechamiento en aplicaciones de ingeniería. Como alternativa, en este proyecto se postprocesa un modelo resultante de optimización topológica para hacer posible su fabricación mediante impresión 3D, esto habilita la combinación del mecanizado CNC y la impresión 3D. A pesar de que la combinación de impresión 3D y moldeo con resina epoxica no dio un resultado favorable en la resistencia mecánica, el procedimiento muestra una metodología escalable para integrar estos dos métodos que puede ser útil y eficiente en otras aplicaciones.

Finalmente, los resultados de este proyecto pueden ser ampliados al aplicar métodos de diseño de experimentos para definir la cantidad de probetas que se deben ensayar y que otras variaciones deben incluirse.

5. Referencias

- [1] T. Woodson, J. T. Alcantara, and M. S. do Nascimento, "Is 3D printing an inclusive innovation?: An examination of 3D printing in Brazil," *Technovation*, vol. 80–81, pp. 54–62, Feb. 2019, doi: 10.1016/j.technovation.2018.12.001.
- [2] C. Xu, G. Dai, and Y. Hong, "Recent advances in high-strength and elastic hydrogels for 3D printing in biomedical applications," *Acta Biomater*, vol. 95, pp. 50–59, Sep. 2019, doi: 10.1016/j.actbio.2019.05.032.
- [3] H. Rogers, N. Baricz, and K. S. Pawar, "3D printing services: classification, supply chain implications and research agenda," *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, vol. 46, no. 10, pp. 886–907, Nov. 2016, doi: 10.1108/IJPDLM-07-2016-0210.
- [4] C. Hodonou, M. Balazinski, M. Brochu, and C. Mascle, "Material-design-process selection methodology for aircraft structural components: application to additive vs subtractive manufacturing processes," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 103, no. 1–4, pp. 1509–1517, Jul. 2019, doi: 10.1007/s00170-019-03613-5.
- [5] A. TONG, J. HU, M. ZHANG, Y. JIN, and J. DU, "Flexible Gripper Manufacturing and Simulation Based on 3D Printing," in *2019 13th Symposium on Piezoelectricity, Acoustic Waves and Device Applications (SPAWDA)*, Jan. 2019, pp. 1–4. doi: 10.1109/SPAWDA.2019.8681858.
- [6] T. Yao, Z. Deng, K. Zhang, and S. Li, "A method to predict the ultimate tensile strength of 3D printing polylactic acid (PLA) materials with different printing orientations," *Compos B Eng*, vol. 163, pp. 393–402, Apr. 2019, doi: 10.1016/j.compositesb.2019.01.025.
- [7] Z. Zhu, V. G. Dhokia, A. Nassehi, and S. T. Newman, "A review of hybrid manufacturing processes – state of the art and future perspectives," *Int J Comput Integr Manuf*, vol. 26, no. 7, pp. 596–615, Jul. 2013, doi: 10.1080/0951192X.2012.749530.
- [8] O. M. Querin, M. Victoria, C. Alonso, R. Ansola, and P. Martí, "Topology Optimization as a Digital Design Tool," in *Topology Design Methods for Structural Optimization*, Elsevier, 2017, pp. 93–111. doi: 10.1016/B978-0-08-100916-1.00006-4.
- [9] J. Yi, T. Zeng, J. Rong, and Y. Li, "A topology optimization method based on element independent nodal density," *J Cent South Univ*, vol. 21, no. 2, pp. 558–566, Feb. 2014, doi: 10.1007/s11771-014-1974-8.
- [10] L. Sun, J. Du, and C. Su, "Methods and application on research of structural topology optimization," in *2012 Proceedings of International Conference on Modelling, Identification and Control*, 2012, pp. 383–387.